

ПРОБЛЕМЫ



БИОНИКИ

выпуск

21

78

И. П. А. / 21

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР  
ХАРЬКОВСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

007 57  
17. 78

# ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

ВЫПУСК 21

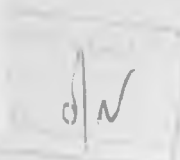
Республиканский  
межведомственный  
научно-технический  
сборник

Основан в 1968 г.

XHYPE Problems byonyky



B-758-3



2001

ХАРЬКОВ  
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ «ВИЩА ШКОЛА»

1978

**Проблемы бионики**, вып. 21. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978. 145+6 с.

Сборник посвящается математическому и физическому моделированию процессов переработки информации на различных уровнях нервной системы — от сенсорного до вербально-логического. Обсуждаются вопросы объективной диагностики живых систем, развивается метод нуля-органа применительно к потребностям психофизики. Предлагаются модели, реализующие особенности функционирования зрительного анализатора, а также нейрореподобные устройства — преобразователи сигналов.

Предназначен для научных работников и специалистов в области бионики, кибернетики, вычислительной техники, инженерной психологии, биологии и медицины. Списки лит. в конце статей.

*Редакционная коллегия:* Ю. П. Шабанов-Кушнарченко (отв. ред.), В. Г. Червов (зам. отв. ред.), Ю. П. Бугай (отв. секр.), Н. М. Амосов, А. А. Волков, В. А. Грабина, А. В. Дабагян, К. А. Иванов-Муромский, А. Г. Мурашко, Е. П. Путьнин.

*Адрес редакционной коллегии:* 310218, Харьков, пр. Ленина, 14, институт радиоэлектроники, тел. 40-96-45.

Редакция естественнонаучной литературы

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НУЛЬ-ОРГАНА В ПСИХОФИЗИКЕ.  
СООБЩЕНИЕ 1

Зрение, слух, осязание и другие чувства открывают человеку панораму физического мира. Эта панорама объемна, заполнена звуками, запахами, многочисленными предметами различной формы и цвета. Наблюдаемый нами мир непрерывно меняется с течением времени. В панораме воспринимаемого мира наблюдатель обнаруживает самого себя и других окружающих его людей. Он обнаруживает также, что является действующим лицом в этом мире, может брать в свои руки предметы и манипулировать ими, может передвигаться, общаться с другими людьми. Поверхностью своего тела, кистью руки человек чувствует тепло и холод, давление и вес предметов, их форму и характер поверхности. Он убеждается в том, что способен контролировать положение частей своего тела и управлять их движением.

Каждый человек склонен принимать открывающуюся ему панораму физического мира за сам физический мир, однако это — заблуждение, своего рода обман чувств, иллюзия. Требуется определенное интеллектуальное усилие, чтобы понять, что эта панорама находится не вне нас, а внутри нас, что она — не физический мир, а лишь изображение физического мира, формируемое нашими органами чувств. Это изображение, или образ физического мира, называется ощущением. Ощущение субъективно, оно существует лишь в сознании человека. «...чувственное представление *не* есть существующая вне нас действительность, а только *образ* этой действительности» [1, с. 114], «...ощущения, т. е. образы *внешнего мира*, существуют *в нас*, порождаемые действием вещей на наши органы чувств» [1, с. 88], «...единственный источник наших знаний — ощущения» [1, с. 127].

Ощущение безо всякой метафоры можно уподобить телевизионному изображению. Разница состоит лишь в том, что оно неизмеримо совершеннее телевизионного изображения. Образ, формируемый органами чувств, выгодно отличается от телевизионного изображения углом обзора, разрешающей способностью, качеством передачи цвета, объема и звучания, он дополнен вкусовым и обонятельным ощущениями. Манипуляторы и

органы перемещения, которыми оборудуются некоторые современные телевизионные приемники информации, по многообразию и точности движений, по объему и качеству воспринимаемой информации существенно уступают двигательной системе человека, его осязательной и кинестетической чувствительности.

Органы чувств, формирующие панораму физического мира, наше ощущение предметов, представляют собой весьма совершенные измерительные приборы, анализирующие находящуюся вне нас действительность. Объектом измерения служат предметы физического мира. Результатом измерения является наше ощущение, т. е. воспринимаемая нами панорама физического мира. Органы чувств осуществляют прямую связь сознания человека с внешним миром (обратная связь сознания с внешним миром осуществляется органами движения). «Для всякого естествоиспытателя, не сбитого с толку профессорской философией, как и для всякого материалиста, ощущение есть действительно непосредственная связь сознания с внешним миром, есть превращение энергии внешнего раздражения в факт сознания» [1, с. 46].

Как и всякие измерительные приборы, органы чувств имеют дело с информацией, перерабатывают ее. Обработка информации, как известно, включает в себя прием, хранение, преобразование и выдачу информации. Органы чувств несут нашему сознанию в обработанном виде информацию о процессах, происходящих во внешнем мире, несут нашему сознанию образ предметов физического мира. «...(ощущения суть образы тел, внешнего мира)» [1, с. 128].

Было бы ошибкой полагать, что органы чувств несут нам всю информацию о предметах физического мира. «...для материалиста мир богаче, живее, разнообразнее, чем он кажется, ибо каждый шаг развития науки открывает в нем новые стороны» [1, с. 130]. «Предметы наших представлений отличаются от наших представлений, вещь в себе отличается от вещи для нас, ибо последняя — только часть или одна сторона первой, как сам человек — лишь одна частичка отражаемой в его представлениях природы» [1, с. 119].

Используя искусственно созданные физические приборы, человек вышел далеко за те естественные границы, которые поставила ему природа вследствие ограниченных измерительных возможностей органов чувств. В настоящее время наука знает о физическом мире неизмеримо больше, чем может дать человеку непосредственное восприятие доставляемой ему чувствами панорамы внешнего мира. Лучи Рентгена, радиоволны и многие другие физические процессы непосредственно недоступны нашим чувствам, однако они успешно отображаются с помощью физических приборов, включенных в общую систему анализа реального мира, в состав которой входят также наши ощущения и наше сознание.

Сравнивая информацию о физических процессах, получаемую наукой всеми доступными ей средствами, с информацией о тех же процессах, которую доставляют нам одни органы чувств без содействия специальных приборов, мы получаем доступ к изучению законов преобразования информации, реализуемого нашими органами чувств. «...ощущение есть *функция* определенным образом организованной материи» [1, с. 59], и эта функция может быть предметом научного исследования.

Область науки, изучающая законы преобразования информации органами чувств человека, называется психофизикой. Объектом исследования в психофизике служат: 1) ощущения человека; 2) физические процессы, действующие на наши органы чувств и вызывающие ощущения; 3) отношение, которым связаны ощущения с предметами внешнего мира. В психофизике можно выделить два направления — экспериментальное и теоретическое. К настоящему времени экспериментальная психофизика накопила обширный фактический материал. Источниками фактов для экспериментальной психофизики служат: 1) изучение анатомии и физиологии органов чувств и мозга человека; 2) изучение поведенческих реакций человека в зависимости от воздействий на него тех или иных предметов внешнего мира; 3) субъективные (интроспективные) наблюдения человека за своими ощущениями.

Теоретическая психофизика ставит своей задачей разработку математического описания ощущений и математического описания зависимости ощущений от физических процессов, действующих на рецепторы человека. Теоретическая психофизика прошла большой путь в своем развитии, над решением ее проблем успешно работали такие выдающиеся умы, как Ньютон, Юнг, Грассман, Гельмгольц, Ом, Максвелл, Шредингер. Значительный вклад в теоретическую психофизику внесли советские ученые П. П. Лазарев, С. В. Кравков, С. О. Майзель, Н. Д. Нюберг, В. В. Мешков, Р. А. Сапожников, Н. Т. Федоров, П. О. Макаров, А. В. Луизов, В. Д. Глезер, С. Н. Ржевкин и многие другие.

Психофизика имеет многочисленные практические и технические приложения. На результаты ее исследований опирается кибернетика, системотехника, вычислительная техника, автоматика, инженерная психология, техническая эстетика, светотехника, акустика, техника кино и телевидения, фотография, полиграфия, телефония, радиосвязь, техника звукозаписи, медицина, техника безопасности, экспертиза и многие другие области практической деятельности людей.

Психофизике принадлежит важная роль при решении основного вопроса философии об отношении материи и сознания. Материализм доказывает, что первична материя, сознание же вторично, идеализм пытается отстаивать противоположную точку зрения. Характер ответа на основной вопрос философии имеет

не только научное, но и большое идеологическое значение. Ленин пишет: «...нельзя не видеть борьбы партии в философии, борьбы, которая в последнем счете выражает тенденции и идеологию враждебных классов современного общества. Новейшая философия так же партийна, как и две тысячи лет тому назад. Борющимися партиями ... являются материализм и идеализм. Последний есть только утонченная, рафинированная форма фидеизма, который стоит во всеоружии, располагает громадными организациями и продолжает неуклонно воздействовать на массы, обращая на пользу себе малейшее шатание философской мысли» [1, с. 380].

Психофизика — сугубо материалистическое учение. Даже самим своим существованием она демонстрирует правильность материализма. Если согласиться с утверждением идеализма и принять за первичное ощущение, то психофизика немедленно лишится своего предмета исследования, так как станет бессмысленным вопрос о зависимости ощущений от внешнего мира. Обращаясь к идеалистам и агностикам, Ленин пишет: «Если вы исходите из того, что все существующее есть ощущение или что тела суть комплексы ощущений, то вы не можете, не разрушая всех своих основных посылок, всей «своей» философии, прийти к тому, что *независимо* от нашего сознания существует *физическое*» [1, с. 59].

Материалистическая теория открывает широкую дорогу для беспрепятственного развития психофизики, обеспечивает ей прочный фундамент. Психофизика на основании полученных ею научных данных показывает, как конкретно происходит превращение энергии внешних физических процессов в факт сознания. Каждый новый успех психофизики — это еще один удар по идеализму, по идеологии эксплуататорских классов.

Задача математического описания ощущений, стоящая перед теоретической психофизикой, весьма своеобразна и не имеет сколько-нибудь близкого аналога в других областях человеческого знания. Ведь требуется математически описать ощущение, т. е. нечто нематериальное, нечто такое, что принципиально недоступно непосредственному физическому обследованию и измерению. Предмет психофизики — ощущение и процесс его формирования, в принципе, отличен от объектов и процессов, изучаемых науками физического цикла. Поэтому неудивительно, что психофизик-теоретик в своих исследованиях сталкивается со значительными трудностями. В частности, эти трудности вызваны слабой разработанностью математических методов, ориентированных на решение задач теоретической психофизики. Непосредственно же применить к этим задачам известные методы математического описания физических процессов не удастся. Отсутствие достаточно разработанных математических методов психофизики существенно тормозит ее теоретические разработки, приводит к тому, что психофизика зачастую делает крен

в сторону чисто эмпирических изысканий. Психофизик с завистью взирает на мощный взлет теоретической физики, на богатство используемого арсенала методических приемов и математических средств.

В статье предпринята попытка на базе уже имеющихся достижений теоретической психофизики разработать простой, эффективный и достаточно общий подход, который позволял бы математически описывать субъективные ощущения человека с той же степенью надежности и полноты, как в физике описываются объективные процессы. Сущность подхода сводится к использованию такого субъективного анализа ощущений испытуемым, который бы завершался его объективно регистрируемым двичным ответом типа «да» — «нет». Оказывается, что во многих случаях опыты такого типа могут служить достаточным экспериментальным основанием для объективного и вполне корректного математического описания ощущений и процессов их формирования. В подобных опытах сознание испытуемого, как правило, используется в роли прибора, регистрирующего равенство или неравенство тех или иных ощущений, поэтому мы называем такой подход методом нуль-органа. Выбор конкретных ощущений для сравнения определяется характером инструкции, которую экспериментатор дает испытуемому.

Рассмотрим источники информации о психофизическом объекте, которые имеются в распоряжении исследователя, и оценим значение каждого из них. Как уже упоминалось, фактические данные для психофизических исследований могут черпаться из трех источников.

Первый источник — это изучение материального субстрата или биологического механизма, осуществляющего преобразование информации, исходящей от внешних объектов, в наше ощущение. Исследуя анатомо-физиологическую структуру органов чувств и мозга человека, принцип действия отдельных элементов этой структуры, способ соединения этих элементов между собой и прослеживая весь комплекс преобразований информации в этой структуре, многие исследователи надеются извлечь отсюда знания о наших ощущениях и о способах их формирования.

Второй источник — это объективное изучение поведения человека. При таком, бихевиористическом, подходе исследователь игнорирует существование каких бы то ни было субъективных состояний у человека, игнорирует его анатомическую и физиологическую структуру, он рассматривает человека лишь как некоторый нерасчленимый на части физический объект, реагирующий вполне определенным, машинообразным способом на те или иные внешние воздействия. Принимается во внимание лишь та информация, которая может быть получена с помощью физических приборов объективным измерением. Если, к примеру, объектом изучения служит человеческая речь, то при

бихевиористическом подходе полностью игнорируется ее смысловое содержание и она рассматривается лишь как некоторое колебание частичек воздуха.

Третий источник — это изучение наших ощущений субъективными средствами, имеющимся в нашем распоряжении внутренним зрением. Дело в том, что каждый человек обладает собственными средствами для анализа ощущений. Благодаря этому анализу мы и приходим к убеждению о существовании наших ощущений и об их большом разнообразии. В течение многих веков интроспективный анализ был единственным методом, с помощью которого наука черпала сведения о субъективном мире человека, о его ощущениях.

Рассмотрим каждый из этих источников в отдельности. Вначале остановимся на анатомо-физиологическом обследовании психофизической системы человека.

Современная наука ведет интенсивное изучение структур нервной системы человека, его рецепторов и мозга. Исследованию подвергаются строение и функционирование отдельных нервных клеток — нейронов, связи и взаимодействие между ними. Изучается функционирование целых слоев нервных клеток, взаимодействие между отдельными нейронными слоями, связь между клеточными структурами различных отделов нервной системы, например между сетчаткой глаза и нейронными ансамблями колленчатого тела, структурами зрительной коры мозга. Ведется математическое описание изучаемых нейрофизиологических процессов.

Несомненно, что ощущения человека являются продуктом деятельности его нервной системы, мозга. В связи с этим часто высказывается надежда на то, что, двигаясь по пути анатомических и физиологических исследований нервной системы человека, изучая материальный механизм мозга, наука в конце концов сможет построить объективную теорию ощущений человека, его субъективного мира. Однако пока еще наука чрезвычайно далека от осуществления этой надежды. Вторгаясь внутрь мозга средствами микроэлектродной техники, исследователь не находит там ни цветов, ни запахов, ни каких-либо других ощущений, ни мыслей, ни сознания. Он видит там лишь сложнейшее переплетение астрономического числа клеток и нервных волокон, по которым движутся в разных направлениях и в замысловатой последовательности электрические импульсы.

Как перебросить мостик между объективными физиологическими процессами, происходящими в мозге человека, и его субъективными ощущениями, как провести параллель между материальным и духовным? Некоторые ученые считают, что это вообще невозможно сделать. Известный физик Шредингер пишет: «На мой взгляд, природа этого параллелизма лежит в стороне от области естественных наук и, весьма возможно, за пределами человеческого понимания» [2, с. 18]. Материалист

не может смириться с подобным утверждением; согласиться с ним — значит признать существование непознаваемых вещей, стать на позиции агностицизма. Ленин пишет: «...противоположность материи и сознания имеет абсолютное значение только в пределах очень ограниченной области: в данном случае исключительно в пределах основного гносеологического вопроса о том, что признать первичным и что вторичным. За этими пределами относительность данного противоположения несомненна» [1, с. 151]. «За этими пределами оперировать с противоположностью материи и духа, физического и психического, как с абсолютной противоположностью, было бы громадной ошибкой» [1, с. 259].

Но как же все-таки проинтерпретировать физиологические процессы в психологических терминах? Предположим на минутку, что весь механизм мозга нами уже изучен в совершенстве, его структура и функционирование математически описаны. Как в таком случае установить, соответствуют ли друг другу данный физиологический процесс и данное ощущение (например, процесс, разыгрывающийся в 17-м поле коры головного мозга, и зрительное ощущение)? Очевидно, что для этого пригоден только один способ: нужно сравнить рассматриваемый нами физиологический процесс с самим зрительным ощущением, точнее, сравнить математическое описание данного физиологического процесса с математическим описанием зрительного ощущения. Совпадение этих двух процессов с точностью до обозначений (способ обозначения при математическом описании, как известно, в счет не принимается) и будет доказательством их тождества. Несовпадение будет означать их различие. Однако для того чтобы провести такое сравнение, необходимо иметь математическое описание ощущений, полученное не зависимым от анатомии и физиологии способом. Математическое описание ощущений должно быть получено каким-то иным способом, не базирующимся на изучении конструкции мозга. Таким образом, одно лишь анатомио-физиологическое изучение человека; его нервной системы и мозга не может дать доказательной теории ощущений. Более того, для своей завершенности анатомио-физиологическое учение само нуждается в независимой от него теории ощущений, поскольку без такой теории невозможна доказательная интерпретация мозговых структур и процессов в психологических терминах.

Рассмотрим теперь второй, бихевиористический подход к исследованию психофизической системы. Бихевиористический подход применим не только к изучению поведения человека, но и к изучению процессов, протекающих в любой другой материальной системе, например к исследованию процессов, происходящих внутри атомного ядра. Этот подход уже на протяжении длительного времени широко используется в науке и технике. В последние десятилетия этот подход получил название метода

кибернетического «черного ящика». Основатель кибернетики Винер так характеризует этот метод: «Пусть дан некоторый объект, относительно отделенный от окружающей среды для своего изучения. Бихевиористический метод состоит в рассмотрении выхода объекта и отношений между выходом и входом. Под выходом понимается любое изменение, производимое объектом в окружении. Обратное, под входом понимается любое внешнее к объекту событие, изменяющее любым образом этот объект. Предыдущая формулировка не содержит никакого упоминания о специфической структуре и внутренней организации объекта. Это принципиальное умолчание, ибо на нем основано



Рис. 1.

различие между бихевиористическим и альтернативным функциональным методом. При функциональном анализе, в противоположность бихевиористическому подходу, главную цель составляет внутренняя организация, его структура и свойства; отношения между

объектом и окружением значат сравнительно мало. Из такого определения бихевиористического метода вытекает весьма широкое определение поведения. Под поведением понимается любое изменение объекта по отношению к окружающей среде. Это изменение может представлять собой преимущественно выход объекта при минимальном, дальнем или побочном входе; или же оно может быть непосредственно приписано определенному входу. В итоге любое преобразование объекта, заметное извне, может быть отмечено как поведение» [3, с. 285—286].

Рассмотрим некоторый «черный ящик», т. е. объект, внутренней организацией которого мы не интересуемся, однако хотим математически описать закономерности поведения этого объекта (рис. 1). Стрелкой  $x$ , направленной к «черному ящику», обозначим вход объекта, стрелкой  $y$ , направленной от «черного ящика», обозначим выход объекта. Задача состоит в том, чтобы на основании наблюдений над поведением «черного ящика» расшифровать вид математической зависимости  $y = Fx$ , лежащей в основе преобразования, реализуемого исследуемым объектом. При решении этой задачи допускается не только пассивное наблюдение за поведением объекта, но и активный эксперимент, в процессе которого исследователь формирует желаемые воздействия на объект и определяет выходные реакции объекта на эти воздействия.

В применении к интересующей нас психофизической системе под «черным ящиком» следует понимать некоторого человека — испытуемого, поведение которого изучается. Под входным воздействием  $x$  следует понимать физические процессы или внешние объекты, действующие на органы чувств испытуемого, под выходным действием  $y$  — произвольные, т. е. сознательные движения человека, включая его речь. Важно подчеркнуть, что дви-

жения эти должны рассматриваться только с их чисто физической стороны вне связи со смыслом, усматриваемым в этих движениях другими людьми. Под зависимостью  $y = Fx$  следует понимать математическую функцию, описывающую закон преобразования входных воздействий  $x$  на органы чувств испытуемого в его ответные действия  $y$ .

Несомненно, что ощущение испытуемого включено в тракт преобразования сигналов от входа  $x$  до выхода  $y$ . В самом деле, испытуемый, у которого внешние воздействия не вызывают никаких ощущений, лишен возможности сознательно реагировать на эти воздействия (если не считать реакцией полное отсутствие каких-либо реакций). Очевидно, ощущение выполняет роль некоторого промежуточного сигнала в этом тракте. Так как ощущения — это единственный источник знаний испытуемого, то на любом пути от внешнего воздействия до реакции испытуемого хотя бы один раз должно встретиться какое-нибудь ощущение. Обозначив ощущение испытуемого буквой  $u$ , можем представить тракт  $F$  преобразования сигналов в виде последовательного соединения двух трактов  $f$  и  $\varphi$  (рис. 2). Функция  $u = fx$  описывает интересующее нас преобразование  $f$  входной информации  $x$ , поступающей в органы чувств от физических объектов, в ощущение  $u$ , возникающее в сознании испытуемого; функция же  $y = \varphi u$  описывает преобразование  $\varphi$  ощущения  $u$  в объективно регистрируемую внешнюю реакцию  $y$  испытуемого. Суперпозиция этих двух функций дает функцию  $F$ , описывающую поведение испытуемого  $y = Fx = \varphi fx$ .

Предположим теперь, что в результате бихевиористического обследования мы отыскали вид функции  $F$ , математически описывающей поведение испытуемого. Более того, предположим также, что нам каким-то образом удалось правильно вычлениить из этой функции интересующую нас функцию  $f$ , описывающую работу психофизической системы человека. Поставим следующий вопрос: как доказать, что сигнал  $u$  и функция  $f$  действительно являются математическим описанием ощущения испытуемого и закона преобразования физических стимулов в ощущение? В пределах чисто бихевиористического подхода не видно ни малейших возможностей для такого доказательства. Чтобы такое доказательство стало возможным, нужно иметь полученную из какого-то независимого источника информацию об ощущении  $u$  либо о функции  $f$ , или же о функции  $\varphi$ . Ясно, что таким источником не может служить анатомо-физиологическое обследование испытуемого.

Таким образом, бихевиористический подход, даже в сочетании с анатомо-физиологическим подходом, недостаточен для решения интересующей нас проблемы математического описания функционирования психофизической системы человека. Слабым местом в бихевиористическом подходе является также и то, что трудности математического описания объекта ката-

строфически растут с увеличением его сложности. Человек же с его ощущениями и сознанием представляет собой объект, наиболее сложный из всех известных науке объектов. Для расшифровки вида функции  $F$  необходимо поставить фантастически большое число опытов.

Наконец, рассмотрим третий источник психофизических фактов — интроспективное обследование ощущений. Интроспекция или внутреннее зрение открывает каждому человеку обширный и многообразный мир его собственных субъективных состояний: ощущений, представлений, мыслей, эмоций, намерений.

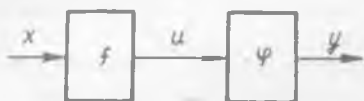


Рис. 2.

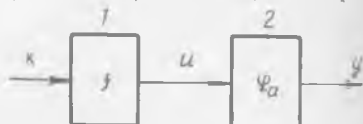


Рис. 3.

Общаясь между собой, люди легко достигают взаимопонимания относительно этих субъективных состояний, без труда передают друг другу информацию об этих ощущениях. В связи с этим возникает впечатление легкого и полного доступа к субъективным состояниям. Однако богатая история более чем двухтысячелетнего интроспективного изучения ощущений неопровержимо доказывает, что это впечатление обманчиво, оно представляет собой не что иное, как иллюзию. Несмотря на то что субъективным анализом ощущений занимались лучшие умы человечества, до сих пор никому еще не удалось, действуя только на этой основе, получить надежное математическое описание ощущений и законов функционирования психофизической системы человека.

Легкость субъективного общения между людьми вовсе не означает, что люди передают друг другу полную информацию о своих ощущениях. Принципы организации психофизической системы у всех людей одинаковы, поэтому для эффективного общения между людьми достаточно передавать не саму информацию об ощущениях, а только ключ, открывающий доступ к ней. Встретившись с представителями внеземной цивилизации, субъективный мир которых организован на иных принципах, чем у нас, человек столкнулся бы с опромными трудностями при попытке проникнуть в мир ощущений этих инопланетян.

Таким образом, приходится признать, что наше внутреннее зрение не дает полного знания об ощущениях, возникающих в нашем сознании, знания, которое могло бы послужить основой для математического описания функционирования психофизической системы. Внутреннее зрение можно сравнить с лучом карманного фонарика, который из тьмы огромного черного ящика психической деятельности выхватывает лишь отдельные детали. Возможности у внутреннего зрения примерно такие же,

как у оператора, сидящего за пультом электронной вычислительной машины. Оператор может по своему желанию подключиться к информации, содержащейся в том или ином регистре ЭВМ. Подобно этому человек может остановить свое внимание на той или иной детали или стороне в панораме своих ощущений, например, обратить внимание на цвет или форму воспринимаемого предмета.

Далее, получив информацию из того или иного регистра машины, оператор не будет иметь при этом ни малейшего понятия о конструкции этого регистра и физических процессах, в нем происходящих, если, конечно, он не ознакомится предварительно с устройством машины. Аналогично, человек, воспринимающий свои ощущения, например музыкальные звуки, не получает никакой информации о том, какие анатомические структуры и физиологические процессы обеспечивают возбуждение этих звуков. Наконец, оператор не в состоянии обозреть весь ход преобразования информации от момента поступления ее в ЭВМ до момента появления ее в заданном регистре и указать вид функции, лежащей в основе этого преобразования. Подобно этому человек на базе интроспективных данных не может проанализировать процесс формирования своих ощущений, не может построить математическое описание этого процесса.

Таким образом, ни один из трех рассмотренных источников психофизических фактов, взятых в отдельности, не может служить достаточным основанием при создании теории работы органов чувств человека. Недостаточность методов анатомо-физиологического и бихевиористического изучения психофизической системы состоит в том, что они, по самой своей сути, исключают из рассмотрения ощущения человека, т. е. выходные сигналы психофизической системы. Недостаточность же метода интроспекции состоит в том, что он не дает всей информации об ощущениях, необходимой для их математического описания. Очевидно, что решение задачи математического описания функционирования психофизической системы человека нужно искать на пути объединения нескольких (по крайней мере, двух) подходов. Ясно, что в их число должен быть включен метод интроспективного наблюдения. Остается еще два подхода. Необходимы ли они оба или достаточно будет привлечь только один из них?

Как уже говорилось, задачей теоретической психофизики является разработка математического описания зависимости ощущений от внешних объектов, действующих на рецепторы человека. Таким образом, нас должна интересовать не структура психофизической системы и не физические процессы, происходящие в ней, а функция, которую она реализует. Эта задача соответствует бихевиористическому подходу, который нацеливает нас на изучение именно функции, реализуемой объектом,

а не его структуры. Анатомо-физиологический подход же вынуждает нас изучать строение объекта и физические процессы, в нем происходящие. Поэтому естественно предпочесть бихевиористический подход и испытать в первую очередь именно этот метод, комбинируя его с методом интроспективного наблюдения. Более чем двухсотлетняя история развития теоретической психофизики убедительно свидетельствует о том, что совместное использование только этих двух методов дает надежную основу для математического описания функционирования психофизической системы.

Как конкретно соединить эти два метода, чтобы стало возможным эффективное математическое описание психофизической системы человека? По крайней мере одна возможность такого соединения существует, она состоит в следующем. Уже говорилось о том, что человек может избирательно останавливать свое внимание на той или иной детали или стороне в панораме своих ощущений. Он может также описать (словами или жестами) результаты анализа ощущений, например рассказать о цвете или форме видимого им предмета. Переход от ощущений к реакции испытуемого, как было сказано выше, может быть математически описан в виде некоторой функции  $\varphi$  (рис. 2).

Тот факт, что режим анализа ощущений может меняться, означает зависимость функции  $\varphi$  от некоторого параметра  $a$ , характеризующего психологическую установку испытуемого. В связи с этим нашу схему можно обобщить, заменив в ней функцию  $\varphi$  семейством функций  $\varphi_a$  (рис. 3). На схеме сигнал  $x$  означает физический стимул, воздействующий на органы чувств испытуемого;  $u$  означает ощущение, возникающее в сознании испытуемого под действием этого стимула;  $y$  означает объективно регистрируемую реакцию испытуемого, представляющую собой результат интроспективного анализа ощущений. Блок 1 изображает психофизическую систему испытуемого, блок 2 — систему, с помощью которой испытуемый осуществляет интроспективный анализ ощущений. Функция  $f$  — это математический эквивалент деятельности психофизической системы, функция  $\varphi_a$  — это математический эквивалент деятельности системы интроспективного анализа ощущений, параметр  $a$  символизирует собой психологическую установку испытуемого на тот или иной конкретный режим анализа ощущений. Конкретный выбор того или иного режима анализа ощущений (т. е. выбор значения параметра  $a$ ) в ряде случаев находится во власти исследователя. Объясняя задание по анализу ощущений, которое предстоит выполнить испытуемому, исследователь, по существу, настраивает блок 2 на выполнение вполне определенных интересующих его операций, вводит в действие некоторую функцию  $\varphi_a$ . Например, исследователь может предложить испытуемому определить высоту тона предъявляемого ему звучания  $z$ , или же определить яркость некоторого светового излучения.

Определяя чисто бихевиористическим методом вид функции  $y = Fx$ , описывающей поведение испытуемого, и зная, кроме того, вид функции  $y = \varphi_a u$ , задаваемой исследователем, можно подыскать такую функцию  $f$ , чтобы для всех  $x$  выполнялось равенство  $Fx = \varphi_a f x$ . Нахождение же вида функции  $f$  как раз и является целью математического описания психофизических процессов.

Следует, однако, отметить, что практическое осуществление этого метода исследования часто наталкивается на серьезные трудности. «Настраивая» испытуемого на тот или иной режим  $a$  анализа ощущений, исследователь далеко не всегда может сказать, какая при этом функция  $\varphi_a$  реализуется испытуемым. Ведь при «настройке» испытуемого исследователь не передает ему полную информацию о функции  $\varphi_a$ . Он передает ему только ключ, с помощью которого механизмы сознания испытуемого каким-то неизвестным способом сами формируют функцию  $\varphi_a$ . Чем сложнее режим анализа ощущений, тем труднее исследователю составить правильное суждение о виде сформированной им функции  $\varphi_a$ .

Для того чтобы быть гарантированным от ошибок при установлении вида функции  $\varphi_a$ , исследователь должен выбирать достаточно простые режимы анализа ощущений. Выбирая простую функцию  $\varphi_a$ , исследователь тем самым упрощает также и функцию  $F$ , облегчая этим ее бихевиористический анализ. Прежде всего исследователь должен позаботиться о том, чтобы была возможно более простой реакция испытуемого  $y$ , т. е. область значений функции  $\varphi_a$  и функции  $F$ . Простейшее множество, на котором может быть задана переменная, состоит из двух объектов. Переменная, заданная на множестве, состоящем из одного объекта, — это уже не переменная, а постоянная, не несущая никакой информации об исследуемой системе. Множество  $\Sigma$ , состоящее лишь из двух различных реакций испытуемого, мы и примем в качестве области значений функции  $\varphi_a$ . Будем обозначать эти реакции символами 0 и 1. Выбор того или иного конкретного вида реакций испытуемого не имеет значения. Это могут быть, к примеру, ответы «да» и «нет», нажатие или ненажатие кнопки, кивок головы или отсутствие кивка. Поразительным является тот факт, что теория психофизических процессов может быть развита достаточно далеко на базе использования только этого простейшего ответа испытуемого. Наиболее важные результаты теоретической психофизикой были получены именно с помощью двоиного ответа испытуемого.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ленин В. И. Полн. собр. соч. Т. 18. М., 1973. 526 с.
2. Шредингер Э. Что такое жизнь? Пер. с англ. М., Атомиздат, 1972. 88 с.
3. Винер Н. Кибернетика. Пер. с англ., М., «Сов. радио», 1968. 326 с.

Поступила 10 марта 1977 г.

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ СИНТЕЗА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ  
АССОЦИАТИВНЫХ МНОЖИТЕЛЬНО-ДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ  
ИТЕРАЦИОННОГО ТИПА ИЗ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
ФОРМАЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ**

В работе [1] изложены основные принципы построения ассоциативных вычислительных устройств (АсВУ) на одноранговых сетях многофункциональных формальных нейронов (МНФН) с кодовой перестройкой логики, реализующих соответствующие вычислительные функции непосредственно по ассоциативным признакам операндов, а в работах [2, 3] даны примеры реализации на основе указанных принципов быстродействующих делительных и множительных устройств.

В настоящей статье показано, что используя метод итераций для вычисления обратного значения делителя  $D_k \in \{1, 2, \dots, 2^n - 1\}$ , можно синтезировать множительно-делительное АсВУ из МНФН, имеющее несколько меньшее быстродействие при выполнении операции деления, чем подобное АсВУ, описанное в работе [2], но зато заметно превосходящее его по количеству разрядов операндов за счет сокращения числа настроечных шин у МНФН АсВУ. Последнее эквивалентно расширению диапазона обрабатываемых чисел.

Пусть  $x = D_k^{-1} \cdot (D_k \neq 0)$ . Тогда, используя известное выражение, описывающее итерационный процесс [4], можно записать

$$x_{i+1} = x_i(2 - D_k x_i), \quad (1)$$

где  $x_i$  — приближенное значение  $x$ , полученное за  $i$  итераций.

Из выражения (1) следует, что для вычисления приближенного значения  $D_k^{-1}$  необходимо выполнить операции умножения и вычитания, которые легко реализуются в АсВУ из МНФН.

Необходимо отметить, что при соответствующем выборе начального значения  $x_0$  сходимость рассматриваемого итерационного процесса довольно быстрая [4].

Обозначим через  $x_{0i}$  нулевое приближение (начальное значение), необходимое для вычисления  $D_k^{-1}$  с точностью  $\epsilon$  ( $\epsilon \leq D_k^{-1}$ ) за  $i$  ( $1 \leq i \leq \infty$ ) итераций. Определим для этих условий область задания  $x_{0i}$ .

При  $i = 1$  выполняется очевидное равенство

$$D_k^{-1} - \epsilon = x_{01}(2 - D_k x_{01}),$$

из которого следует, что

$$x_{01} = D_k^{-1} \pm \sqrt{\epsilon D_k^{-1}}.$$

Пусть теперь  $i = 2$ . Тогда

$$x_1 = x_{02}(2 - D_k x_{02}), \quad (2)$$

а

$$D_k^{-1} - \epsilon = x_1(2 - D_k x_1). \quad (3)$$

Полагая, что  $x_1 < D_k^{-1}$ , из выражений (2) и (3) путем несложных преобразований получаем

$$x_{02} = D_k^{-1} \pm \sqrt[4]{\epsilon D_k^{-3}}.$$

Проведя аналогичные вычисления для  $i = 3, 4, \dots$  нетрудно показать методом индукции, что для произвольного  $i$  имеет место следующее равенство:

$$x_{0i} = D_k^{-1} \pm \sqrt[2^i]{\epsilon D_k^{-(2^i-1)}}.$$

Назовем  $\Delta_1 = D_k^{-1} \left(1 + \sqrt[2^i]{\epsilon D_k}\right)$  верхней границей, а  $\Delta_2 = D_k^{-1} \left(1 - \sqrt[2^i]{\epsilon D_k}\right)$  — нижней границей области задания нулевого приближения  $x_{0i}$ , обеспечивающего вычисление за  $i$  итераций по формуле (1) обратного значения  $D_k$  с точностью  $\epsilon$ .

Очевидно, что если для данного  $D_k$  в качестве нулевого приближения взять значение верхней границы  $\Delta_1$  области задания  $x_{0i}$ , то для всех чисел  $D_p \leq D_j \leq D_k$ , где число  $D_p$  находится из уравнения

$$D_k^{-1} \left(1 + \sqrt[2^i]{\epsilon D_k}\right) = D_p^{-1} \left(1 - \sqrt[2^i]{\epsilon D_p}\right), \quad (4)$$

точность вычислений их обратных значений за  $i$  итераций будет не хуже  $\epsilon$ .

При заданных значениях  $i$  и  $\epsilon$ , используя уравнение (4), можно разбить все упорядоченное множество чисел  $\{D_k\}$  на полностью покрывающие его непересекающиеся упорядоченные подмножества  $\{D_k\}_j$ , в каждом из которых нулевое приближение для вычисления обратного значения старшего элемента является нулевым приближением для вычисления за  $i$  итераций с точностью не хуже  $\epsilon$  обратных значений всех остальных элементов данного подмножества.

В связи с тем, что при  $D_k \geq 1$ ,  $\epsilon < 1$ ,  $i \geq 1$  имеет место неравенство  $D_k^{-1} \sqrt[2^i]{\epsilon D_k} > \epsilon$ , легко видеть, что в данном случае количество подмножеств  $\{D_k\}_j$ , на которые разбивается множество  $\{D_k\}$ , меньше, чем в случае, рассмотренном в [2], при той же точности вычисления обратных значений элементов множества  $\{D_k\}$ , причем с увеличением числа итераций  $i$  эта разность растет. Последнее указывает на то, что количество настроечных

шин и структурная сложность МНФН в АсВУ, вычисляющем обратное значение делителя методом итераций, ниже, чем в АсВУ, вычисляющем приближенное значение  $D_k^{-1}$  непосредственно по его ассоциативным признакам. Следовательно, при одинаковой структурной сложности МНФН в обоих типах АсВУ допустимая разрядность операндов и диапазон участвующих в операции деления чисел  $D_k$  в первом из указанных типов АсВУ больше, чем во втором. Эту разность можно еще более увеличить, если ввести некоторые дополнительные ограничения на выбор границ подмножеств  $\{D_k\}_j$ , в результате которых для определения вхождения данного  $D_k$  в  $j$ -е подмножество и вычисления соответствующего значения нулевого приближения  $x_{0i}$  достаточно провести анализ  $r < n$ , а не  $n$  разрядов делителя  $D_k$ , как делалось в [2].

Очевидно, что среди чисел из множества  $\{D_k\}$  всегда можно найти такие, чтобы их двоичные  $n$ -разрядные коды удовлетворяли следующим условиям: в  $l \geq 0$  младших разрядах содержатся одни нули, в последующих  $1 < r < n$  разрядах содержатся единицы, число которых  $s$  лежит в пределах  $1 \leq s \leq 2^r - 1$ , а в  $n - (l + r) \geq 0$  старших разрядах содержатся одни нули.

Будем полагать, что только такие числа из множества  $\{D_k\}$ , коды которых удовлетворяют сформулированным условиям, могут являться младшими элементами подмножеств  $\{D_k\}_j$ . Но поскольку эти подмножества не пересекаются и полностью покрывают множество  $\{D_k\}$ , то старшим элементом каждого последующего (более младшего) подмножества является такое число  $D_k$ , код которого отличается на единицу младшего разряда от кода младшего элемента предыдущего (более старшего) подмножества. Отсюда следует, что в  $l$  младших разрядах кода старшего элемента каждого подмножества  $\{D_k\}_j$  всегда содержатся одни единицы. Подобные условия, накладываемые на граничные элементы упорядоченных подмножеств  $\{D_k\}_j$ , позволяют существенно упростить логический анализ вхождения данного числа  $D_k$  в  $j$ -е подмножество и структуру МНФН АсВУ. Последнее вычисляет обратные значения чисел  $D_k$ , незначительно сокращая количество элементов в подмножествах, сформированных путем решения уравнения (4) без учета указанных ограничений.

При заданных значениях  $n$ ,  $\epsilon$ ,  $i$  и  $r$  разбиение упорядоченного множества  $\{D_k\}$  на упорядоченные подмножества  $\{D_k\}_j$  следует начинать со старшего элемента, приняв его в качестве старшего элемента первого (старшего) подмножества  $\{D_k\}_1$ . Затем, подставив значение этого элемента в уравнение (4), необходимо найти элемент  $D_{p_1} \in \{D_k\}$  и проверить, удовлетворяет ли он сформулированным выше условиям, накладываемым на младший элемент подмножества  $\{D_k\}_1$ . Если удовлетворяет, то на этом процесс формирования подмножества  $\{D_k\}_1$  заканчивается.

Отняв у  $D_{p_1}$  единицу младшего разряда, получим старший элемент второго подмножества  $\{D_k\}_2$  и аналогичным образом ищем его младший элемент  $D_{p_2}$  и т. д.

Двоичную запись содержимого старшей  $r$ -разрядной группы кода числа  $D_k$  можно представить аналогично [2] в виде суммы  $A_\nu + B_\mu$ , где

$$A_\nu = \sum_{i=r-q+1}^r p_i 2^{i-1}, \quad 0 \leq \nu \leq 2^q - 1; \quad (5)$$

$$B_\mu = \sum_{i=1}^{n-q} p_i 2^{i-1}, \quad 0 \leq \mu \leq 2^{r-q} - 1;$$

$$p_l = d_l \wedge \left( \bigvee_{\gamma=r+l+1}^n d_\gamma \right) \wedge \left( \bigvee_{\gamma=r+l+1}^n d_\gamma \right), \quad (6)$$

$d_j$  ( $1 \leq j \leq r$ ) — значение  $j$ -го разряда старшей  $r$ -разрядной группы кода числа  $D_k$ ;  $d_\gamma$  — значение разряда номер  $\gamma$  ( $r \leq \gamma \leq n$ ) кода числа  $D_k$ ;  $l$  — количество младших разрядов кода числа  $D_k$ , расположенных справа от старшей  $r$ -разрядной группы;  $l'$  — количество младших разрядов кода числа  $D_k$ , расположенных справа от  $r$ -разрядной группы, следующей за старшей.

Выражения (5) и (6) описывают логику работы узла анализа и выделения из старшей  $r$ -разрядной группы кода числа  $D_k$  чисел  $A_\nu$  и  $B_\mu$ , используемых для вычисления нулевого приближения  $x_{0i}$  обратного значения числа  $D_k$  путем реализации одно ранговой сетью из МНФН операции

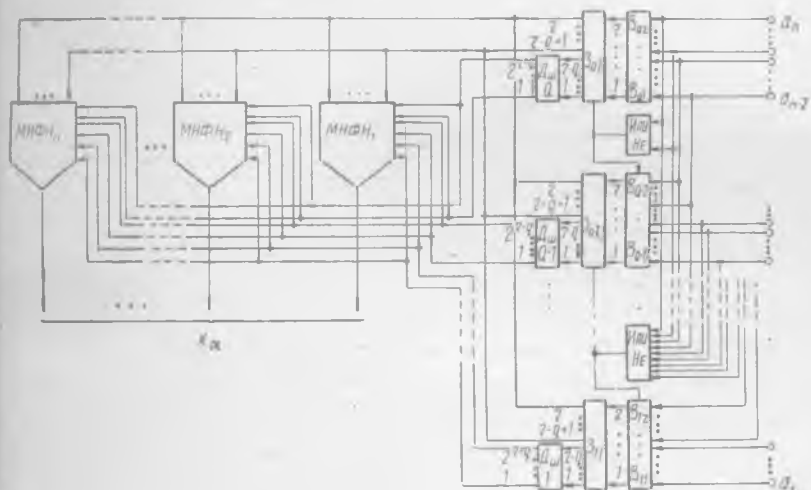
$$L(A_\nu, B_\mu) = D_k^{-1} \left( 1 + \bigvee_{\varepsilon \in D_k} \varepsilon \right).$$

Блок-схема АсВУ для вычисления нулевого приближения  $x_{0i}$  по результатам анализа содержимого старшей  $r$ -разрядной группы делителя  $D_k$  приведена на рисунке. АсВУ состоит из сети МНФН, настраиваемых сигналами от  $Q$  дешифраторов настройки  $D_{ij}$ , каждый из которых имеет  $r - q$  входов и  $2^{r-q}$  выходов, местного устройства управления, представляющего собой узел анализа и выделения чисел  $A_\nu$  и  $B_\mu$  из старшей  $r$ -разрядной

группы числа  $D_k = \sum_{\gamma=1}^n d_\gamma 2^{\gamma-1}$ , в состав которого входят  $Q$  групп вентилей  $B_{ij}$  ( $1 \leq i \leq Q$ ,  $1 \leq j \leq r$ ) и соответствующих им групп схем запрета «3и», а также  $i = Q - 1$  схем «ИЛИ — НЕ», выходящих сигнал каждой из которых открывает  $i$ -ю группу вентилей  $b_{ij}$  и закрывает  $(i + 1)$ -ю группу схем запрета. Следует отметить что количество настроечных шин у каждой МНФН в описанной структуре АсВУ равно  $Q \cdot 2^{r-q}$ .

В комбинированном множительно-делительном АсВУ, вычисляющем обратное значение делителя методом итераций, однац ранговая сеть МНФН используется для вычисления нулевого приближения  $x_{0i}$  обратного значения делителя, а также для вычисления всех операций умножения, включая операции умножения, необходимые при вычислении обратного значения делителя и частного.

Все множество элементов такой сети обычно разбивается на две группы, в каждой из которых содержится не менее  $n$  МНФН. В связи с этим множество вычисляемых нулевых приближений  $x_{0i}$  следует разбить на два подмножества и воспроизводить элементы каждого из них в соответствующей группе МНФН. При такой структуре АсВУ количество настроечных шин у МНФН, необходимых для вычисления нейронной сетью всего множества нулевых приближений  $x_{0i}$ , становится равным  $Q \cdot 2^{r-q-1}$ .



Блок-схема подобного множительно-делительного АсВУ в основном совпадает с блок-схемой АсВУ, представленной в [2]. Отличается она введением в состав множительно-делительного АсВУ описанного выше местного устройства управления и буферного  $n$ -разрядного регистра, входы которого соединены с выходами собирательных схем «ИЛИ $_k$ » ( $1 \leq k \leq n$ ), а выходы — со входами регистра  $P, A_n$ . Кроме того, в АсВУ вводятся новые функциональные связи между выходами схем «ИЛИ $_k$ » и входами регистра  $P, A_n$  и между выходами сумматора  $СМ_2$  и входами регистра  $P, B_\mu$ .

Подобное множительно-делительное АсВУ в режиме умножения работает аналогично комбинированному АсВУ, описанному в работе [2].

В режиме вычисления обратного значения делителя по итерационной формуле (1) множительно-делительное АсВУ работает следующим образом. В регистр  $P, B_\mu$  заносят делитель  $D_k$ , а остальные регистры остаются пустыми. С помощью местного устройства управления из кода числа  $D_k$  выделяют старшую  $r$ -разрядную группу и МНФН настраивают сигналами от дешифраторов  $Дш_i$  на реализацию нулевого приближения  $x_{0i}$  обрат-

ного значения делителя. После реализации  $x_{0i}$  его код заносят в буферный регистр и в регистр  $P_r A_v$ .

Затем умножают число  $x_{0i}$ , помещенное в регистр  $P_r A_v$ , на делитель  $D_k$ , хранящийся в регистре  $P_r B_\mu$ . Произведение  $D_k x_{0i}$  поступает в сумматор  $СМ_2$ , где производится вычитание его из программно занесенного туда числа 2. Разность  $(2 - D_k x_{0i})$  из сумматора  $СМ_2$  заносят в регистр  $P_r B_\mu$ . После этого содержимое регистра  $P_r A_v$  умножают на содержимое регистра  $P_r B_\mu$  и в сумматоре  $СМ_2$  формируется первое приближенное обратное значение делителя  $x_1 = x_{0i}(2 - D_k x_{0i})$ , которое заносят в регистр  $P_r B_\mu$ .

Если необходимое количество итераций  $i > 1$ , то итерационный процесс продолжается аналогично описанному выше, за исключением формирования нулевого приближения  $x_{0i}$ . А если  $i = 1$ , то в регистр  $P_r A_v$  заносят делимое, которое затем умножают на содержимое регистра  $P_r B_\mu$ . В результате этого в сумматоре  $СМ_2$  формируется частное.

В комбинированном множительно-делительном АсВУ с описанной организацией структуры время выполнения операции деления при  $i = 1$  определяется выражением

$$t_{\text{дел}} = 3t_{\text{ум}} + \tau_{\text{ом}} + \tau_{x_{01}},$$

где  $\tau_{x_{01}}$  — время формирования нулевого приближения  $x_{01}$ . Полагая, что  $\tau_{x_{01}} = \tau_{\text{см}}$ , получаем

$$t_{\text{дел}} = 2(t_{\text{ум}} + \tau_{\text{см}}) + t_{\text{ум}},$$

а при  $i > 1$

$$t_{\text{дел}} = (2i + 1)t_{\text{ум}} + (i + 1)\tau_{\text{см}}.$$

Возможны и другие модификации структуры комбинированного множительно-делительного АсВУ из МНФН, вычисляющего обратное значение делителя методом итераций. Например, не сколько изменив функциональные связи между регистрами в описанном выше множительно-делительном АсВУ и настроив режим вычисления нулевого приближения  $x_{01}$  одну группу из МНФН на реализацию значения  $x_{01}^2$ , а другую — на реализацию значения  $2x_{01}$ , можно одновременно получить обе эти величины и занести их, соответственно, в регистр  $P_r A_v$  и в буферный регистр. Затем умножить делитель  $D_k$ , хранящийся в регистре  $P_r B_\mu$ , на содержимое регистра  $P_r A_v$ . Произведение  $D_k x_{01}^2$  занести в сумматор  $СМ_2$ , добавив к нему в следующем цикле вычисления эту величину  $2x_{01}$ , хранящуюся в буферном регистре. А сумму  $x_1 = 2x_{01} - D_k x_{01}^2$  занести в регистр  $P_r B_\mu$ . После этого занесенное в регистр  $P_r A_v$  делимое надо умножить на содержимое регистра  $P_r B_\mu$ , в результате чего в сумматоре  $СМ_2$  сформируется частное.

При числе итераций  $i = 1$  такая организация структуры множительно-делительного АсВУ из МНФН позволяет сократить время деления двух  $n$ -разрядных чисел по сравнению с множи-

тельно-делительным АсВУ структура которого была описана выше, на время выполнения одной операции умножения, т. е. в рассматриваемом АсВУ из МНФН

$$t_{\text{дел}} = 2(t_{\text{ум}} + \tau_{\text{см}}).$$

Однако при этом структурная сложность МНФН оказывается выше, так как у них число настроечных шин, необходимых для реализации нулевого приближения  $x_{01}$  обратного значения делителя, равно  $Q \cdot 2^{r-q}$ .

При числе итераций  $i > 1$  данное множительно-делительное АсВУ по сравнению с рассмотренным выше при выполнении операции деления выигрыша во времени не дает.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапов В. И., Нестерук В. Ф. Принципы построения ассоциативного вычислительного устройства из формальных нейронов.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 14. Харьков, «Вища школа», 1975, с. 89—94.
2. Потапов В. И., Нестерук В. Ф. Деление двоичных чисел в ассоциативном вычислительном устройстве из многофункциональных нейроноподобных элементов с кодовой перестройкой логики.— В кн.: Вычислительная техника и системы управления. Изд-во Омск. политехн. ин-та, 1974, с. 31—35.
3. Нестерук В. Ф., Потапов В. И. Множительное устройство. Авт. свид. № 487388.— «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1975, № 37.
4. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. М., «Наука», 1970.

*Поступила 8 июня 1976 г.*

УДК 62.506.2

ЧУДАКОВ В. Н.

#### К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР МОЗГА

Теория условных и безусловных рефлексов [1] не объясняет формирование и передачу мозговых структур, реализующих понятийную форму естественного языка. В связи с этим возникает необходимость нейрокибернетического анализа таких механизмов и структур, которые обуславливают понятийный код языка, а также форму его эволюции.

В настоящее время четко выделяют два процесса наследственности: 1) результат материальной непрерывности генетической информации в половых клетках; 2) результат передачи социального опыта одного поколения следующему посредством раздражительных механизмов нервной системы, речи, знаково-символьных систем (социальная память) [2, 3]. С возникновением социальной среды появилась новая форма хранения

опыта общественных животных (в знаково-символьном понятийном языке) — социальная память [4]. Социальная память положила начало закреплению и эволюции структур мозга, способных усваивать социальный опыт в понятийном (знаково-символьном) коде языка. Эволюцию структур мозга, способных усваивать социальную память в понятийной форме языка, в отличие от биологической будем называть биосоциальной эволюцией структур мозга.

Рассмотрим биологическую эволюцию структур мозга. Если положить в основу рассуждений закон сигнальности, открытый И. И. Павловым, то мы приходим к выводу, что эволюция может осуществить сигнализацию жизненно важных факторов путем морфогенетического закрепления определенных нервных структур мозга, а также путем образования временных ассоциаций в условиях постнатальной жизни организма [5]. Прогрессивная классическая эволюция мозга сводится к тому, что те реакции организма, которые в истории его развития были связаны с постоянными факторами, переводятся на более верный экономичный путь реагирования. Это и есть врожденная деятельность, которая имеет готовые структуры мозга. Данный тип приспособления характеризует I сигнальную систему и заключается в том, что необходимые для жизни организма условия внешней среды приводят к развитию определенных структур закрепленных систем, которые обеспечивают машинообразную деятельность мозга и точные приспособительные акты на определенные раздражения. В процессе эволюции мозга выработалась при усложнении условий существования особая форма структур и механизмов мозга. Последние способны связываться с любыми, как бы они не были изменчивы, внешними условиями среды. Так сформировалась низшая форма II сигнальной системы — форма условных рефлексов, связанных не с постоянными, а с изменчивыми условиями внешнего мира.

Итак, биологическая эволюция структур мозга характеризуется накоплением и передачей в наследственном коде структур и механизмов мозга, соответствующих I и низшей форме II сигнальных систем.

Роль биологической эволюции для человеческого мозга сильно снизилась в связи с резким прекращением естественного отбора. В связи с возникновением «социальной памяти» человеческого опыта в форме естественного понятийно-образного языка началась новая ступень эволюции человеческого мозга — биосоциальная эволюция. Она существенно отличается от биологической эволюции мозга (например, у высших животных). Накопление врожденных программ и инстинктов сводится к минимуму. Так же сводится к минимуму и формирование механизмов и структур, реализующих условные рефлексы [4].

Таким образом, с возникновением социальной среды и социальной памяти появилась новая форма эволюции структур

мозга. Она обуславливает формирование и эволюцию структур мозга, способных усвоить социальную память, закодированную в понятийном языке. Это высшая форма развития II сигнальной системы. С этой формой связано и формирование новых структур мозга, которые являются как бы отрицанием рефлекторных (условных и безусловных) связей и которые обуславливают знаково-символьный код понятийного языка. Действительно, знаково-символьная форма языка не связывается ни с каким биологически важными раздражителями внешней среды. Она выражает только знаковую функцию. Структуры мозга, выражающие знаковую функцию, способствовали выработке вычислительных процедур, понятий и образов знаково-символьного языка.

Рассмотрим кратко нейропсихологический механизм высшей формы II сигнальной системы. Перечислим стимулы, которые вызывают реакцию структур мозга I и II сигнальных систем. Одни раздражители однозначно вызывают врожденные, безусловно-рефлекторные ответы. Эта форма взаимодействия мозга со средой называется стимул-реакция. Другие раздражители вызывают условные рефлексы, способствующие или противодействующие безусловно-рефлекторным, инстинктивным или простым реакциям.

Но существует третий вид стимулов, который не может быть отнесен к первым двум [2, 4—7]. Этот вид стимулирования действий индивида обуславливается тем побочным фактом, что другой наблюдаемый им индивид осуществляет тот или иной рефлекс под влиянием раздражителей, которые отнюдь не воздействуют на афферентные пути данного индивида. Данный вид раздражителей называют имитацией чужого поведения или подражательным поведением [4].

Итак, сила автоматического подражания без всякого прямого подражания способна вызвать у другого индивида некое действие. Имитационный «рефлекс» данного индивида при стечении благоприятных биологических условий может провоцироваться неадекватным рефлексом другого индивида, оттесняя иные реакции и действия. В нейрофизиологии такой акт называется интердикцией [7]. Именно интердикция лежит в основе механизмов II сигнальной системы. Этот специфический механизм образует фундамент, на основе которого возможен переход от I и низшей формы II сигнальной системы к высшей форме II сигнальной системы. Закрепленная и наследственная передача механизмов интердикции положила начало биосоциальной эволюции мозга.

Главное в биосоциальной эволюции мозга человека — повышающаяся биопластичность мозга, т. е. все большая способность к усвоению социальной памяти человечества. Это существенно отличает эволюцию человеческого мозга от эволюции мозга высших животных. У животных нет социальной памяти, записанной в форме кода понятийного языка. Возникает необходимость

выяснения структур мозга, способных усваивать социальную память человечества в знаково-символьной понятийной форме языка.

В работе [8] были формально сформулированы следующие принципы универсальной кодировки мозга всех наблюдаемых и экспериментальных данных в концептуальной форме понятийного языка.

1. *Принцип вычислительной процедуризации информационных процессов индукции и дедукции.* Этот принцип характеризует процедуризацию информационных процессов в переходе от наблюдаемых конструкторов к вычислимым понятиям-концептам, а также обратный процесс от вычисленных понятий (концептов) к искусственным реализациям, к частным выводам в понятийном коде языка. Первый процесс генерирует вычислимые искусственные реализации концептов (траектории), которые являются редукцией информации, содержащейся в концепте.

2. *Принцип концептуального характера функционирования мозга человека в форме нейрональной целостной системы.* Этот принцип обуславливается существованием в человеческом мозге особых нейрональных функционирующих единиц — КАНов (концепт ансамблей нейронов). Эти материальные структуры мозга характеризуют вычислимость понятий, образов в понятийном коде языка. Совокупность КАНов обуславливает высшую форму II сигнальной системы. На множестве КАНов можно ввести ряд свойств и логику КАНов. В абстрактном виде она сформулирована в [9]. Теперь понятна материальная основа мозга, на которой реализуются структуры операций интеллекта в смысле Ж. Пиаже [10]. Это концепт-ансамбли нейронов, которые соответствуют вычислимым процедурам образования концептов. Для КАНов справедливы рассуждения и доказанные [10] теоремы о структурах операций формирующего интеллекта

Таким образом, с возникновением социальной среды и социальной памяти резко сокращается биологическая эволюция структур мозга и начинается новая форма эволюции — биосоциальная форма. Она характеризует высший этап развития сигнальной системы и выражает эволюцию знаково-символьно-приспособительной функции мозга. В нейрофизиологическом плане возникают и эволюционируют КАНы концепт-ансамблей нейронов, осуществляющих вычисление понятий в понятийном коде естественного языка. В силу того что человеческий мозг с самого рождения помещен в искусственную знаково-символьную социальную среду, у него сводится к минимуму развертывание механизмов и структур, осуществляющих безусловные и условные рефлексы. Максимально идет формирование и реализация вычислимых процедур, способных быстро усваивать социальную память в понятийной форме языка. Следствием этого является удлинение периода «детства» — периода реализации суц

и формирования КАНов. В нейрофизиологическом плане усложнение и эволюция КАНов выражаются во все возрастающей биопластичности мозга. Возрастающая биопластичность мозга является характеристикой биосоциальной наследственности человеческого мозга.

Чтобы выяснить формирование концептуальных процедур в онтогенезе мозга человека, используем метод парадигм, предложенный Т. Куном. Для исследований в «нормальной» науке ученого подготавливают в течение 1,5 десятков лет планомерно и эффективно. Но как только создаются кризисные ситуации в науке и разработка проблем, возникающих на стыках областей наук, то такие исследователи не могут перестроить свою деятельность. Их место занимают «самородки», которые формировались нестандартным способом. Возникает задача выяснить различие интеллектуальных баз исследователей, работающих в нормальной и аномальной науке, а также выяснить структурные особенности интеллектуального аппарата и механизмы его формирования и переформирования. Разработка, исследование данной проблемы требуют формирования понятийного языка. В настоящее время выяснена формальная (структурная) сторона образования понятий-концептов.

В математическом смысле концепт — это дискретно-булев полуфункционал, заданный на определенном числе элементов, которому может быть сопоставлено некое слово-понятие на человеческом языке. Если определенные элементарные признаки и значения закодированы бинарным способом, например  $\check{A}_1 = \{A_1 \bar{A}_1\}$ , ...,  $\check{A}_n = \{A_n, \bar{A}_n\}$ , то разные слова-понятия запишутся в форме слов длиной  $n$ . Слова эти являются дискретно булевыми полуфункционалами типа

$$\check{\Phi}_v = \{\bar{x}_1, x_2, x_3, \dots, \bar{x}_v, \check{x}_{v+1}, \dots, \check{x}_n\},$$

где  $\bar{x}_1, x_2, x_3, \dots, \bar{x}_v$  — признаки существенные, остальные — несущественные. Полуфункционал  $\check{\Phi}_v$  в математической форме изображает пучок возможных «траекторий» (бинаризованных слов), соответствующих данному понятию.

Главные параметры концепт-понятия: длина концепта  $n$ ;  $l$  — число существенных переменных;  $n - l$  — число несущественных переменных. На множестве переменных концепт-понятия  $\{\check{x}_i = P_i e^{if_i}\}$  можно задавать фазовую логику (алгебру) над высказыванием с фазой [2]. Посредством операций фазовой логики можно проводить трансформацию как модулей переменных, так и их фаз. Трансформация концепт-понятия происходит также вследствие увеличения и преобразования существенных и несущественных переменных. Множество концепт-понятий образует

концептуальное ядро понятий (КЯП), которое обуславливает специфический базис вычислительных процедур концепт-понятий. Оно характеризуется следующими параметрами:  $\epsilon$  — коридором 1.  $L_{\max}$  — длиной концептуальных процедур (траекторий) вычисления понятий в пространстве признак-значение;  $\sigma$  — системой фильтров;  $\alpha$  — параметром вхождения данной концептуальной процедуры в другие. 4.

Каждое ядро понятий можно представить в виде функционала с набором существенных и несущественных концепт-понятий для данного ядра: 5.

$$F_i(\bar{\Phi}_1, \Phi_2, \Phi_3, \bar{\Phi}_4, \dots, \Phi_i, \bar{\Phi}_{i+1}, \dots, \check{\Phi}_{k+1}, \dots, \check{\Phi}_n). \quad 7.$$

Функционально связанные  $F_i$  КЯП образуют концептуальный интеллектуальный базис человека. Рассмотрим, какими могут быть формы КЯПов. 8.

1. Расширяющиеся КЯПы. По мере разработки данной проблемы с накоплением фактов и идей происходит рост числа концептов, существенных и несущественных. При этом сохраняется вид полуфункционала. 0.

2. Инверсирующие КЯПы. Они связаны с сохранением числа существенных и несущественных концепт-понятий, но в некоторых концепт-понятиях происходит инверсия переменных и добавление новых значений признаков. В качестве примера можно привести переход от механики Ньютона и теории относительности Эйнштейна.

3. Структурные КЯПы, когда меняется вид функционала при неизменности концепт-понятий.

4. Комбинированные (интегрированные) КЯПы, когда концептуальное ядро понятий составляется из КЯПов по разным проблемам. Это характерно для проблем, которые возникают на стыках областей наук.

5. Сингулярные КЯПы. Эти ядра возникают специфическим образом и несовместны с другими КЯПами.

Различные функциональные связи КЯП формируют различные модельные картины мира. Связка КЯП характеризует интеллектуальный базис исследователя.

В онтогенезе формирование, трансформация концептуальных процедур осуществляется с помощью генетически обусловленных генераторов спонтанного самовозбуждения нейронных комплексов. Количество и разнообразие типов волн-сигналов, генерируемых генераторами самовозбуждения, также задаются непосредственно.

Целостные перестройки концептуально-понятийных базисов мозга происходят с большим трудом и при стрессовых состояниях. Есть еще один способ перестройки концептуально-понятийных ядер в случае применения психоделических веществ. Но работы в этом направлении только начаты и трудно поддаются контролю. 10.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов И. П. Лекции в работе больших полушарий головного мозга М., «Наука», 1962. 420 с.
2. Давиденков А. С. Эволюционно-генетические проблемы невропатологии. М.-Л., 1947. 437 с.
3. Моль А. Социодинамика культуры. М., «Прогресс», 1973. 670 с.
4. Поршнева Б. Ф. О начале человеческой истории. М., «Наука», 1974. 380 с.
5. Анохин П. К. Социальное и биологическое в природе человека.— В кн.: Социальное и биологическое в развитии человека. М., 1975, с. 92—105.
6. Естественный и искусственный интеллект.— «Тр. IV МОКИЙ», Тбилиси, «Мецниереба», 1976. 360 с.
7. Прибрам К. Языки мозга. М., «Мир», 1975. 507 с.
8. Чавчанидзе В. В. К общей теории концептуальных систем.— «Сообщение ИК АН ГССР», Тбилиси, 1973. 25 с.
9. Чавчанидзе В. В. К абстрактной теории искусственного концептуального интеллекта.— «Тр. IV МОКИЙ», 1975. 250 с.
10. Чудakov В. Н. Алгебраическая природа мышления.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 13. Харьков, 1973, с. 27—35.

*Поступила 20 марта 1976 г.*

УДК 62—501.72

*С. А. ФИЛОНИК*

### О СИСТЕМЕ КАУЗАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАК СОСТАВНОЙ ЧАСТИ СЕМИОТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ

В работах [1, 2] заложены основы семиотического подхода к построению системы прогнозирования поведения больших социальных систем как системы автоматической обработки текстов на языке, близком к естественному. Этот подход, в отличие от распространенного статистического, опирается на имитацию человеческих рассуждений о причинах и следствиях, о целях и реализующих эти цели планах, которые широко используются человеком в реальной практике прогнозирования.

Составной частью семиотической системы прогнозирования является система каузативного прогнозирования, реализующая имитацию человеческих умозаключений и логических выводов о возможных в будущем следствиях наблюдающихся в данный момент причин. Чтобы разработать систему каузативного прогнозирования, необходимо формализовать имеющиеся в естественном языке средства порождения причинно-следственных отношений между событиями, т. е. построить каузативную логику, до некоторой степени воспроизводящую способы обнаружения человеком причинно связанных событий в общем их потоке.

В настоящей работе предложен один из возможных вариантов программы, имитирующей порождение человеческим мыш-

лением причинно-следственных отношений в ходе построения их прогнозов.

Изложим вначале исходные модельные допущения о характере организации семиотической системы каузативного прогнозирования (один из возможных вариантов). Предположим, что система разбита на уровни в соответствии со степенью обобщенности понятий, используемых для описания сущности событий и ситуаций на каждом из уровней. Одно и то же событие объективного мира может быть описано в терминах разной степени всеобщности и абстрактности. Значит, отражение этого события в языке носит многоуровневый характер, так что на каждом из уровней обобщенности описания сущность события отражается с различной степенью глубины. Характерно, что значения смыслов понятий разных уровней языка описания не пересекаются, и между понятиями разных уровней обобщенности могут быть установлены родо-видовые отношения.

При описании указанной (одной из многих возможных) программы построения каузативных прогнозов мы опираемся на следующую гипотезу о механизме (индуктивного) построения следствий причин на данном уровне обобщенности. Если человек, имея перед собой событие  $X$ , рассматриваемое в качестве причины, сразу (интуитивно) усматривает обусловленное им следствие  $Y$ , то это означает, что у него в памяти хранится утверждение ( $CAUSE\ X\ Y$ ) ( $X$  детерминирует (причинно обуславливает)  $Y$ ) вместе с обоснованием его справедливости. В качестве обоснования справедливости отношения ( $CAUSE\ X\ Y$ ) может выступать одно из двух. Во-первых, обоснованием может быть развертка этого отношения до произвольного ниже лежащего уровня обобщенности (вплоть до уровня базовых каузативных пар) по отношению к данному уровню, в терминах которого описаны события  $X$  и  $Y$ . Во-вторых, в качестве обоснования данного причинно-следственного отношения могут выступать и абстрактные теоретические построения, обобщенные закономерности, характеризующие на отвлеченном уровне обществу внутренне необходимые связи между событиями.

В первом случае для обоснования причинно-следственной связи человек спускается на ниже лежащие уровни обобщенности описания, где он строит каузативную сеть — развертку причинно-следственного отношения данного уровня. Во втором случае для обоснования справедливости причинно-следственного отношения данного уровня происходит обращение к лежащим выше уровням, где анализируются общие закономерности предмета возможности дедуктивного вывода из них справедливости причинно-следственного отношения. Если такой дедуктивный вывод возможен, то эти общие закономерности представляют собой теоретическое обоснование данного причинно-следственного отношения (в отличие от первого случая, который

можно назвать поиском эмпирического обоснования каузативной связи данного уровня обобщенности).

В случае поиска эмпирического обоснования для каузативной связи уровня  $k$  человек строит на  $(k - 1)$ -м уровне каузативную сеть из тех каузативных пар уровня, которые хранятся у него в памяти. Если подходящих для построения этой развертки каузативных пар на  $(k - 1)$ -м уровне нет (или не хватает), происходит спуск на еще более низкий уровень обобщенности ( $k - 2$ ), при котором снова проверяется возможность построения каузативной сети из имеющихся в памяти каузативных пар этого уровня. Этот спуск на лежащие ниже (в смысле обобщенности описания) уровни с целью построить на них каузативные сети-развертки причинно-следственных отношений лежащих выше уровней заканчивается на одном из лежащих ниже уровней, на котором имеется достаточно каузативных пар для построения соответствующей каузативной сети-обоснования справедливости причинно-следственного отношения лежащего выше уровня.

Последним уровнем в принципе может оказаться нулевой уровень обобщенности — уровень базовых каузативных пар, задаваемых человеком априорно (для системы, а в случае реального человеческого причинно-следственного мышления — интуитивно усматриваемых им как самоочевидные) и не нуждающихся в каком-либо их обосновании. Базовые каузативные пары даются человеком в достаточном количестве, в силу чего на нулевом уровне обобщенности построение каузативной сети всегда возможно. Спуск на лежащие ниже-уровни обобщенности осуществляется в соответствии с отношением ( $ABSTR\ X\ Z$ ) —  $X$  более абстрактно, чем  $Z$ , причем как  $X$ , так и  $Z$  описывают (на разных уровнях обобщенности) одно и то же событие объективно реального мира, а смыслы понятий  $X$  и  $Y$  могут не пересекаться. Таким образом, если потребуется найти на  $k$ -м уровне следствие, обусловленное причиной  $X$ , и в памяти отсутствуют каузативные пары, у которых левый аргумент (причина) совпадает с  $X$ , тогда на  $(k - 1)$ -м уровне ищут следствие, обусловленное событием  $Z$ , выступающим здесь в качестве причины. После построения на одном из лежащих ниже уровней каузативной сети возврат на исходный ( $k$ -й) уровень обобщенности описания происходит также в соответствии с отношением  $ABSTR$ . Например, если на  $(k - 1)$ -м уровне построена каузативная сеть, одной из концевых вершин которой является событие  $W$ , и если в массиве данных (в памяти) имеется выражение ( $ABSTR\ Y\ W$ ), то делают вывод, что  $Y$  есть следствие, обусловленное событием  $X$  (на  $k$ -м уровне). Этот вывод правомерен в силу того, что 1)  $X$  является более обобщенным описанием события, которое описывается (на менее обобщенном уровне) выражением, именуемым как  $Z$ ; 2)  $Y$  является более обобщенным описанием того же самого события, которое описывается

на менее обобщенном уровне выражением, именуемым как  $W$  (3) события  $Z$  и  $W$  связаны (через посредство каузативной сети построенной на  $(k-1)$ -м уровне) отношением причина — следствие. Ясно, что эти три посылки служат достаточным основанием для справедливости утверждения о наличии причинно следственной связи между событиями  $X$  и  $Y$  уровня  $k$ .

Если же выражение  $(ABSTR\ Y\ W)$  отсутствует в памяти (массиве данных), т. е. человек не знает, какому событию  $k$ -го уровня обобщенности отвечает событие  $W$   $(k-1)$ -го уровня, то тогда человек привлекает механизмы обобщения абстрагирования для построения описания структуры события (заданного на  $(k-1)$ -м уровне структурой с именем  $W$ ), терминах  $k$ -го уровня обобщенности описания. После построения (в результате обобщения или посредством наложения фрейма на событие  $W$ ) описания  $Y$  рассматриваемого события в терминах  $k$ -го уровня в массив данных (в память) заносится выражение  $(ABSTR\ Y\ W)$ . После этого становится возможным высказывание о справедливости (истинности, обоснованности) утверждения о наличии каузативной связи между событиями  $X$  и  $Y$  уровня  $k$ .

Несмотря на то что наложение фрейма, как и обобщение, приводит к более обобщенному описанию события, между ними есть качественная разница.

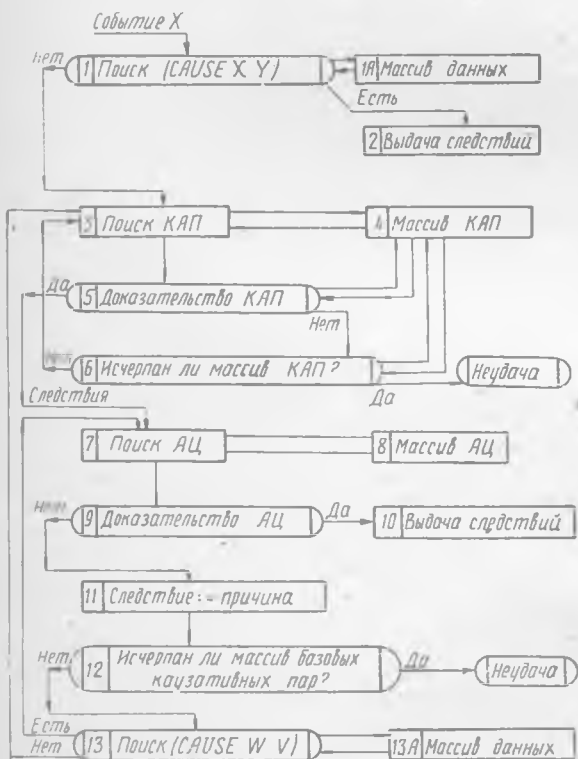
При обобщении (построении события  $Y$  по событию  $W$  событие  $Y$   $k$ -го уровня содержит в своей структуре некоторую часть смысла события  $W$   $(k-1)$ -го уровня, тогда как при наложении фрейма получается такое событие  $Y$   $k$ -го уровня смысл которого не пересекается со смыслом события  $(k-1)$ -го уровня, так как смысл события  $Y$  выражает его глубинную структуру содержания объективно реального события, не передаваемую в смысле события  $W$   $(k-1)$ -го уровня.

Отметим также, что априорное задание выражения  $(ABSTR\ X\ Z)$ , необходимого для спуска на следующие нижние уровни обобщенности описания при построении эмпирического обоснования причинной связи данного уровня как развертки в виде каузативной сети лежащего ниже уровня, — это априорное задание оправдано потому, что смысл событий  $X$  и  $Z$  могут не пересекаться, в силу чего терпит фиаско даже сама постановка вопроса в каком-либо конструктивном построении события  $Z$   $(k-1)$ -го уровня по событию  $k$ -го уровня через анализ их смыслов.

Опишем теперь блок-схему программы (она приведена на рисунке), реализующей приведенные выше модельные представления о некоторых особенностях человеческого причинно-следственного мышления. При этом мы будем пользоваться введенной в [2] терминологией. Это означает, что описание рассматриваемого здесь варианта программы каузативного прогнозирования будет происходить в терминах теорем и их рекурсивного последовательного вызова. Построение развертки причини

следственного отношения есть его обоснование, и потому теоремы, реализующие такой разворот (построение каузативных сетей на лежащих ниже уровнях обобщенности), естественно назвать КАП-теоремами (консеквентно-антецедентными типа причины).

Консеквентными — потому что задан консеквент (причинно-следственное отношение с известной причиной и неизвестным следствием) и требуется построить его обоснование — развернуть это причинно-следственное отношение в виде каузативной сети на нижележащем уровне обобщенности описания:



Антецедентными такие теоремы можно назвать потому, что строящаяся в результате развертки причинно-следственного отношения цепочка каузативных пар (на лежащем ниже уровне обобщенности) обращена в будущее и начинается (исходит) из условий теоремы как из антецедента. Консеквентом в такой интерпретации разворота причинно-следственного отношения является последнее следствие в цепочке каузативных пар одного из лежащих ниже уровней обобщенности описания, выраженное в терминах того же уровня обобщенности, что и антецедент.

Типа причины эти теоремы называются потому, что речь идет о причинах и следствиях, а не о целях.

Кроме КАП-теорем при описании программы построения каузативных прогнозов используется и АЦ-теоремы (антецедентные цели), введенные в [2]. Построение доказательства АЦ-теорем реализует поиск иерархии целей, на обеспечение достижения которых направлена данная совокупность действий — план. Под эту схему подпадают также наложение фрейма на ситуацию и поиск ее (ситуации) обобщения, поскольку здесь по данному антецеденту — описанию нижнего уровня обобщенности строится консеквент — описание того же события в терминах более высокого уровня обобщенности.

В соответствии с блок-схемой, приведенной на рисунке, в начале описание на семантическом языке (языке понятий и отношений) ситуационного управления) ситуации  $X$ , подлежащей прогнозированию, поступает в блок 1 — «поиск» ( $CAUSE\ X\ Y$ ). Напомним, что для случая каузативного прогнозирования построение прогноза означает поиск следствий, обусловленных данными причинами (на разных уровнях обобщенности).

Для обоснования каузативной связи ( $CAUSE\ X\ Y$ ) с известными  $Y$  вначале (в блоке 1) в массиве данных происходит поиск соответствующего выражения, и в случае успеха переменная  $Y$  присваивается значение следствия, зафиксированное в этом выражении в массиве данных. Это значение выдается (в блоке 2) в результате доказательства рассматриваемой теоремы как следствие, обусловленное причиной  $X$  (выдаются такие следствия, найденные в массиве данных).

В случае неудачи прямого поиска в массиве данных управление передается в блок 3, который осуществляет поиск в массиве КАП-теорем (блок 4) нужной КАП-теоремы, допускающей сопоставление с целью ( $CAUSE\ X\ Y$ ). Необходимая для обоснования выражения ( $CAUSE\ X\ Y$ ) КАП-теорема либо прямо указывается в описании исходной теоремы (она вводится оператором  $THUSE$ , что означает явное задание отношения ( $ABSTR\ X\ Z$ ), либо самостоятельно ищется системой в массиве КАП-теорем (блок 4), из которого выбираются те теоремы консеквент которых имеет вид ( $CAUSE\ Z\ W$ ), причем в массиве данных имеется выражение ( $ABSTR\ X\ Z$ ). (Возможны и другие способы задания соответствия между консеквентом исходной теоремы и консеквентом теоремы, вызываемой для обоснования консеквента исходной теоремы).

После нахождения нужной КАП-теоремы в блоке 5 происходит построение ее доказательства в процессе которого привлекаются необходимые КАП-теоремы из соответствующего массива (блока 4). В процессе построения доказательства этой теоремы ищутся все следствия, обусловленные причиной  $X$  (где  $Z$  — описание исходного события на более низком уровне обобщенности, т. е. имеет место ( $ABSTR\ X\ Z$ ). Эти следствия

ищутся либо прямым поиском в массиве данных, либо (в случае неудачи прямого поиска) привлекаются еще и другие КАП-теоремы (для нахождения неизвестных следствий события  $Z$ ). Если доказательство выбранной КАП-теоремы не удалось построить, в блоке  $b$  проверяется, все ли КАП-теоремы уже использованы. При этом также происходит обращение в блок 4. Если массив КАП-теорем уже исчерпан, то появляется сигнал о неудаче доказательства исходной теоремы. Если же нет, то происходит возврат в блок 3, где снова ищется подходящая КАП-теорема.

Если в блоке 5 доказательство выбранной КАП-теоремы успешно построено, то полученные при этом следствия  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  события  $Z$  (на  $(k-1)$ -м уровне) передаются в блок 7. Здесь необходимо проверить, реализуют ли эти следствия события  $Z$  (полученные на  $(k-1)$ -м уровне) некоторые следствия события  $X$  (на  $k$ -м уровне обобщенности описания). Дело в том, что КАП-теорема (пусть для определенности с именем ТА2) вызывалась исходной теоремой (с именем ТА1), и доказательство теоремы ТА2 строилось для обоснования антецедента теоремы ТА1, т. е. для обоснования наличия причинной связи между событием  $X$  и неизвестным событием  $Y$ . Успешное доказательство теоремы ТА2 (получение следствий  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  события  $Z$  на  $(k-1)$ -м уровне) представляет собой построение на более низком уровне (чем уровень  $k$  теоремы ТА1) развертки причинно-следственного отношения ( $CAUSEXY$ ) (с неизвестным  $Y$ ).

В данном случае построено только первое звено этой развертки — каузативная пара ( $CAUSE Z W$ ), являющаяся, видимо, только первым звеном в цепи каузативных пар, разворачивающих отношение ( $CAUSE X Y$ ). В принципе развертка может ограничиться только одной этой каузативной парой. При этом каузативная пара ( $CAUSE Z W$ ) на  $(k-1)$ -м уровне обобщенности будет служить обоснованием каузативной пары ( $CAUSE X Y$ ) на  $k$ -м уровне, так что реализация каузации ( $CAUSE Z W$ ) на  $(k-1)$ -м уровне автоматически влечет реализацию каузации ( $CAUSE X Y$ ) на  $k$ -м уровне. Здесь между событиями  $X$  и  $Z$  отсутствует какая-либо семантическая связь (их смыслы не пересекаются). Единственная между ними связь (интуитивно усматриваемая человеком, но, видимо, недоступная формализации) заключается в том, что порождение причиной  $Z$  следствия  $W$  может быть описано на более высоком уровне обобщенности как порождение причиной  $X$  следствия  $Y$ . Связь этих каузативных пар формально задается чисто внешне (без основания ее внутренне необходимого характера) — посредством оператора  $THUSE$ , который предписывает для обоснования антецедента одной КАП-теоремы использовать доказательство другой КАП-теоремы. Это предписание задается извне человеком, а его внутренне необходимый характер внутри языка никак не выражается (так как в языке нет для этого средств — ведь смыслы

описания — уровень базовых каузативных пар. На этом (нулевом) уровне все возможные следствия некоторых причин находятся в результате непосредственного прямого поиска в массиве данных.

Эти операции реализуются в блоках 11, 12, 13. В случае неудачи попытки построения доказательства АЦ-теоремы в блоке 9 (невозможности перехода с  $(k-1)$ -го на  $k$ -й уровень обобщенности описания) управление передается в блок 11, в котором следствия  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$   $(k-1)$ -го уровня, полученные на предыдущем такте, начинают рассматриваться как причины, для которых необходимо найти следствия того же  $(k-1)$ -го уровня.

Далее в блоке 12 проверяется, есть ли еще базовые каузативные пары, не использованные для построения каузативных сетей на нулевом уровне обобщенности. Если массив базовых каузативных пар исчерпан, то выдается сигнал «неудача». Если же нет, то тогда в блоке 13 осуществляется прямой поиск в массиве данных выражения (*CAUSE W V*) с заданным  $W$ . В случае успеха этого поиска найденные следствия события  $(k-1)$ -го уровня передаются в блок 7, где снова предпринимается попытка найти для данных следствий  $v_1, \dots, v_n$   $(k-1)$ -го уровня отвечающие им события (следствия)  $k$ -го уровня обобщенности описания (в результате построения доказательства соответствующих АЦ-теорем). Если же прямой поиск в массиве данных выражений вида (*CAUSE W V*) окончился неудачей (в блоке 13), тогда управление передается в блок 3 для построения следствий  $(k-1)$ -го уровня для событий  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  через обращение к лежащим еще ниже уровням (в данном случае — через спуск на  $(k-2)$ -й уровень обобщенности описания).

В заключение отметим, что конструктивное построение описанной здесь системы каузативного прогнозирования требует привлечения данных о конкретной предметной области, для которой эта система строится. Массив базовых каузативных пар составляется на основе содержательного анализа характерных для данной предметной области (социальной системы) причинно-следственных связей, дальнейшее обоснование которых через еще более детальный их разворот в виде соответствующей каузативной сети лежащего ниже уровня не представляет интереса с точки зрения некоторых глобальных целей и задач. Эти связи принимаются как самоочевидные и задаются как базовые. Для формирования массива КАП-теорем необходимо априорное задание отношения *ABSTR* на множество описаний событий из разных уровней обобщенности. Это позволит задать соответствие между теоремами, называемыми друг друга в процессе построения их доказательства. Для формирования массива АЦ-теорем необходимо задание массива фреймов и процедур обобщения. Все эти вопросы решаются в процессе содержательного анализа структуры событий, возможных в конкретной предметной области.

Изложенное следует рассматривать как определенный вклад в конструктивную разработку семиотической системы прогнозирования социального поведения, описанной в общих чертах в [1, 2] как система автоматической обработки текстов на естественном языке.

Автор благодарит Д. А. Поспелова за плодотворные дискуссии, способствовавшие улучшению качества статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филоник С. А. О построении прогнозирования социального поведения на базе семиотических моделей. Часть 1. Постановка задачи. Фреймы.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 19. Харьков, 1977, с. 140—148.
2. Филоник С. А. О построении системы прогнозирования социального поведения на базе семиотических моделей. Часть 2. Теоремы. Общая блок-схема системы.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 20. Харьков, 1977, с. 140—149.

*Поступила 17 февраля 1977 г.*

УДК 581.1.03+577.3

*В. И. ЛАВРИНЕНКО*

#### К АНАЛИЗУ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАСТЕНИЯХ

Внезапное изменение условий внешней среды, как известно, вызывает в исследуемом объекте реакцию, вид которой несет существенную информацию о его свойствах.

Описание динамики переходного процесса (так называемой переходной функции) с помощью дифференциальных уравнений различного порядка дает возможность получить количественные критерии оценки состояния объекта, будь то физическое тело или сложная биологическая система.

Указанный подход оказался весьма эффективным и при исследовании различных биохимических процессов в растениях.

В работе [1] показано, что на основе анализа биоэлектрической реакции (БЭР), которой соответствуют биохимические процессы, вызванные внезапным изменением освещенности растения, можно производить диагностику его функционального состояния путем сравнения количественных значений коэффициентов дифференциальных уравнений, описывающих такую реакцию. В частности, можно определять стадии заболевания, вызванного вирусом.

Рассмотрим вопрос об автоматизации процесса диагностирования. Прежде всего отметим, что диагностика на основе анализа БЭР удобна, поскольку может осуществляться в реальном масштабе времени и без буферных преобразователей исходной информации. Тем самым обеспечивается возможность экспресс-анализа при ограниченных аппаратных затратах.

Аппаратурная реализация процессов определения коэффициентов дифференциальных уравнений, что необходимо, напри-

мер, при диагностике по способу, рассмотренному в [1], принципиальной трудности не представляет. Однако характер БЭР допускает возможность применения более простых методов анализа.

Один из таких методов заключается в следующем. Известно [1], что при существенных патологических изменениях переходные процессы у ряда растений имеют слабо выраженный колебательный характер или даже однофазны (рисунок). Отсюда следует, что ориентировочную оценку функционального состояния растения по БЭР можно производить по критерию фазности.

В соответствии с этим необходимо следующее.

1. Получить набор БЭР заданной культуры.

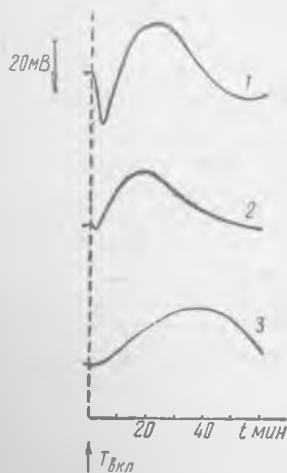
2. Путем статистической обработки на основе априорных сведений установить границы, в пределах которых БЭР может считаться однофазной.

3. При диагностике состояния других образцов указанной культуры в определенных условиях полученные граничные значения использовать в качестве эталона. Диагностика при этом производится путем сравнения параметров БЭР исследуемого растения с эталоном.

Нетрудно видеть, что аппаратная реализация такого метода очень проста, так как основу диагностического устройства при этом составляет фазочувствительный двустабильный элемент. Недостаток описанного метода, заключающийся в невозможности получения градуальных оценок функционального состояния, в ряде случаев не является существенным.

Для получения градуальных оценок состояния растений диагностическое устройство должно обеспечить выделение и анализ всех наиболее существенных компонент, характеризующих БЭР. Как известно, проблема выделения наиболее существенной информации в диагностике является чрезвычайно актуальной. Существует много методов ее решения, причем эффективность того или иного метода ограничена спектром частот анализируемых процессов, их вероятностными характеристиками и т. п.

Когда диагностика состояния систем производится путем анализа их переходных функций, весьма эффективен метод [2], базирующийся на концепции о максимальной информативности экстремумов процесса  $x(t)$ . Согласно этому методу из анализируемого сигнала  $x(t)$  (в данном случае — переходной функции процесса) выделяют только моменты появления экстремумов, опре-



деляют их амплитуды и время появления, кодируют и в основе исследования полученного амплитудно-временного кода экстремумов ( $x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n$ ) производят диагностику

Если учесть, что экстремальные точки БЭР, являющейся переходной функцией  $x(t)$ , отражают взаимодействие переходных процессов подсистем, ответственных в растении за генерацию ионов различной полярности [1], то амплитудно-временные соотношения между этими экстремальными точками должны, следовательно, отражать и удельный вес каждой из подсистем в функционировании системы (растения) в целом. Таким образом, исследование амплитудно-временного кода экстремумов БЭР, полученной при внезапном изменении освещения растения, может служить основой для градуальной оценки его функционального состояния.

Поскольку в таком коде учтена вся существенная информация об исследуемом процессе (доказано [2], что указанный код в принципе обратим, т. е. на основе этого кода допустимо возникновение исходного процесса), автоматическое устройство реализующее данный метод, должно обеспечить высокую достоверность результатов анализа.

Итак, для получения градуальных оценок функционального состояния растений по его БЭР диагностическое устройство должно обеспечивать анализ кодов экстремумов исходных сигналов. Процесс такого анализа заключается в нормировании этих кодов и сравнении с эталонами, которые также в кодовом виде содержат набор описаний различных функциональных состояний определенной культуры (или нескольких культур) растений.

Таким образом, при этом необходимо следующее.

1. Получить набор тестов — БЭР заданной культуры растений при определенном ее состоянии.
2. Путем усреднения амплитудно-временных нормированных кодов БЭР получить для каждого функционального состояния культуры соответствующий эталон.
3. Определить величины максимального отклонения каждого из тестовых кодов от эталонного (поразрядно).
4. С учетом полученных данных установить для каждого эталона допустимые границы отклонений.

Диагноз ставится после выполнения логических операций связанных с определением, какой из эталонов соответствует (или близок) коду БЭР исследуемого растения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К диагностике функционального состояния растения. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 20. Харьков, 1978, с. Авт.: А. П. Пасичный, И. Д. Поляков, Г. В. Цепков и др.
2. Цепков Г. В. Новый метод автоматической классификации непрерывных временных функций. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 14. Харьков, 1977, с. 103—114.

Поступила 13 февраля 1977 г.

## СПОСОБЫ АДАПТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СИСТЕМ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Основными проблемами в современной науке и прикладной деятельности являются задачи исследования законов формирования, развития, устойчивого функционирования и превращения элементов и структур как материальных, так и идеальных форм существования объектов на различных уровнях бытия — от элементарных частиц в физике микромира до социальных организаций и мировоззренческих, духовных основ личности. Эти законы лежат в основе функционирования технических и природных систем. Они определяют также формы деятельности человека в процессе преобразования систем, их конструирования и управления ими. Повышение качества результатов труда и его производительности, т. е. увеличение количества и ценности вырабатываемых продуктов при непрерывно сокращаемых затратах — главная стратегия производственной деятельности человека. Успешная реализация этой стратегии предполагает овладение законами динамики, структуры и организации управляющих и исполнительных систем, а также законами их формирования и функционирования с учетом человеческого фактора.

Современное производство базируется на высокой степени дифференциации и специализации технологических процессов и операций. Именно в этом направлении оказались возможными механизация и автоматизация человеческого труда, которые привели к резкому повышению эффективности и интенсификации производства. Автоматизация следующего уровня, базирующаяся на результатах предыдущей ступени, выдвигает повышенные требования к устойчивости характеристик этих результатов, к управляемости и надежности функционирования каждого из взаимосвязанных технологических процессов, согласованию и координации функционирования элементов и подсистем в целостном производственном комплексе. В современном виде последний является многомерным по своей природе, состоит из ряда взаимосвязанных циклов и, следовательно, требует новых, системных методов и средств анализа и синтеза, управления и оценок результатов функционирования.

Интенсификация производства и расширение его масштабов, применение высокодифференцированных и высокоспециализированных технологических процессов и операций повлекли за собой проявление новых особенностей их характеристик как объектов управления и автоматизации. На первый план стали выступать нестационарность и нелинейность системных компонентов и, как следствие, непредсказуемость их поведения в условиях изменяющейся среды и целей функционирования. Поэтому на-

строенная однажды на эффективное функционирование сложная система со временем будет только ухудшать свои характеристики из-за старения своих элементов, их отказов, изменения в грузок, условий вещественно-энергетического обмена с другими объектами или со средой.

На современном этапе научно-технических достижений трудности автоматизации многомерных нестационарных и взаимосвязанных процессов и систем преодолеваются на путях внедрения новой идеологии автоматизации, связанной с адаптивными, самоприспосабливающимися, самоусовершенствующимися устройствами управления. Высокую живучесть и эффективность подобной «стратегии» демонстрируют организованные системы естественного происхождения и прежде всего — биологические.

В последнее время утвердилось стремление к взаимопроношению наук. Она выражает не только стремление к формированию целостных и непротиворечивых концепций о различных формах движения материи, но обогащает одни науки и практическую деятельность общими абстрактными формами, моделями и методами других. Наиболее выраженной в этом отношении является кибернетическая концепция и, в частности, ее биологическое направление.

В рамках этой концепции возрастает эффективность разработок новых способов и средств автоматизации, в том числе адаптивных, за счет сужения поля априорного объема возможных направлений исследований в связи с учетом эволюционных «достижений» организованных систем в процессе «решения» ими аналогичных проблем адаптации, переработки информации и управления сложными многосвязными системами.

Ближайшее рассмотрение реального функционирования приспособляющихся естественных самоорганизующихся систем (ЕСС) свидетельствует о наличии бесчисленного разнообразия элементов, богатства их свойств, динамических характеристик и неопределенности состояний, не поддающихся однозначному соотношению друг с другом в процессе функционирования целостной системы. Существующие методы исследования сложных систем в настоящее время не позволяют установить адекватные законы функционирования адаптивных ЕСС. Накопленные данные об организации функционирования одного организма и его подсистем, как правило, являются индивидуальными и малопригодными для предсказания функционирования не только другого организма, но и данного через определенный промежуток времени.

В последнее время формируется представление о том, что законы развития сложных систем проще законов их функционирования [1]. В данной работе отражены некоторые результаты анализа способов адаптивного функционирования ЕСС содержанием которых являются совокупности действий и изук

нений в системе в процессе ее приспособления и жизнедеятельности.

Решение этой задачи наталкивается на трудности получения достоверных данных о способах адаптивного функционирования ЕСС. Эти трудности усугубляются еще и тем, что отсутствует единая точка зрения на методику получения этих данных. На первый взгляд представляется целесообразным воспользоваться методом черного ящика. Однако эта позиция в данном случае является логически несостоятельной, так как поведение, т. е. внешнее проявление системы как ее интегральная функция, само является результатом действия определенных приспособительных процессов. В данном случае результат адаптации принимается за сам процесс приспособления. Более того, конкретное поведение системы, как правило, случайно, не имеет определенного характера соотношения с действиями среды.

В то же время в рамках системно-структурного подхода не подвергается сомнению истинность положения об однозначной детерминации структуры, а следовательно, и ее функции составом элементов системы и связями между ними. В пределах этой позиции основной вес в исследовании способов формирования адаптивного функционирования ЕСС переносится на элементный уровень.

Рассмотрим в связи с этим поведение элементов на различных уровнях организации ЕСС в процессе онтогенеза. Заметим, что в данной работе мы будем ограничиваться анализом способов формирования адаптивного функционирования на уровне онтогенеза, когда структура средств приспособлений [2] уже отработана в процессе эволюции, филогенетически, а в онтогенезе ее содержание только конкретизируется. В принципе не имеет значения, какие элементы мы будем рассматривать конкретно в процессе анализа способов адаптации. Это могут быть любые средства приспособления [2], которые используются системой в процессе приспособления к условиям существования или к определенным целям.

Одним из таких средств для одноклеточных организмов, а также для любых клеток многоклеточных организмов является белок. Он играет роль структурного компонента протоплазмы и органелл, а также является основным структурным и функциональным элементом ферментов и гормонов [3], выполняет ведущую роль в физиологических функциях — транспорт веществ через мембрану, сократительная функция и др.

Бноснятез белка осуществляется в клетке на специализированных органеллах — рибосомах под управлением генетических структур ДНК и РНК. В зависимости от этого управления может быть синтезировано в принципе бесчисленное количество типов белков. Каждый из них представляет собой своего рода текст, напечатанный двадцатибуквенным алфавитом, где роль букв играют аминокислотные остатки.

В клетке существуют хорошо отлаженные механизмы регуляции синтеза белка. Это структурные генетические механизмы выбора типа белка, регуляции уровня активности соответствующих генов (гены-операторы), ответственные за скорость синтеза белка, механизмы регуляции последовательности аминокислот в белке (гены-регуляторы). Количество синтезируемого белка контролируется также через механизм индукции, т. е. через влияние концентрации готового белка на генетические механизмы регуляции синтеза.

Механизмы синтеза поставляют белок в клетку в виде линейной полипептидной цепочки. Эта первичная структура под действием различных компонентов протоплазмы поступает в окружение клеточных подструктур, находящихся на различных стадиях жизнедеятельности и функциональных возможностей.

В зависимости от характера взаимодействия первичной структуры с этим окружением и от аминокислотного состава белка он подвергается ряду пространственных трансформаций: образуя вторичную, третичную и четвертичную структуры. Пространственная конфигурация этих структур белка непрерывно изменяется (флуктуирует) под воздействием различных факторов среды. Эти изменения определяют функциональную специфичность белка [3], обеспечивая определенные приспособительные реакции клетки во внешних условиях.

По истечении определенного времени существования белка также при определенных критических состояниях среды могут наступать необратимые изменения в его структуре, приводящие к деструкции, распаду и последующему выводу его из клетки.

Таким образом, состав, тип и свойства белкового компонента клетки, которые обеспечивают соответствующие приспособительные функции ее, определяются механизмами выбора и рождения некоторых первичных структур, а также скорости синтеза и величины концентрации, организацией взаимодействия этих структур со средой клетки, развитием вторичной, третичной и четвертичной структур белка, т. е. формированием таких свойств, которых эти элементы не имели в результате синтеза, а приобрели, находясь в системе конкретного окружения других функционирующих элементов и факторов среды. Приобретенные таким образом свойства в процессе развития элемента в системе мы будем называть системными и связывать их с обеспечением специфики функционирования. Отработанный и подвергшийся денатурации белок распадается и выводится механизмами выделительной системы клетки.

Другими важнейшими клеточными компонентами органической и неорганической природы являются нуклеиновые кислоты, вода, ионы различных веществ и др. По отношению к ним можно осуществить аналогичный анализ с соответствующей их природе спецификой. Так же, как и в случае белка, для каждого из них можно выделить несколько качественно различных с

длий — порождение некоторой системой элементов с первичными характеристиками или поиск и вовлечение их в клетку в результате ее взаимодействия со средой, организация и размещение в клетке первичных элементов, развитие системных свойств в результате их взаимодействия с клеточными компонентами и факторами среды, деструкция по истечении времени жизни или в результате предельных воздействий и элиминация.

В любой момент времени каждый элемент клетки по всему множеству их типов находится на одной из стадий своего жизненного цикла — порождение, первичная организация, развитие и созревание, деструкция, разрушение и элиминация. Сочетание активности этих стадий в различных вариантах и степенях проявления по всем компонентам определяет содержание реакции целостной системы на внешнее воздействие. Формирование этих стадий в сочетаниях с факторами среды и клетки является основным содержанием способов адаптации в процессе жизнедеятельности целостного клеточного организма.

На уровне многоклеточного организма важнейшими структурно-функциональными компонентами являются клетки и межклеточная среда, образованная растворами органических и неорганических веществ. Адаптивное функционирование организма определяется составом, организацией клеток и продуктами их жизнедеятельности. Начальная структура организма обеспечивает порождение новых элементов, клеток и взаимодействие со средой в процессе соответствующего обмена веществом, энергией и информацией.

Новые клетки в организме появляются в результате самовоспроизведения путем митоза существующих. После деления новые клетки взаимодействуют с компонентами организма и благодаря этому занимают определенные положения по отношению к функционирующим клеткам, испытывая соответствующие организующие и упорядочивающие воздействия со стороны существующей структуры организма и факторов среды.

Под влиянием этих воздействий каждая клетка развивается в некоторый специализированный вещественно-энергетический или информационный преобразователь. Благодаря этому одни клетки развиваются в клетки крови, другие — в мышечные, третьи — в нервные и т. д. Совокупность однотипных клеток, получивших одинаковую специализацию, образует ткани, а последние являются основой для формирования органов. В процессе развития клетки некоторые ее свойства могут получить гипертрофированные изменения (например, форма мембранной оболочки у нейронов), а другие компоненты могут элиминировать полностью (например, ядро у клетки гемоглобина и т. д.). В процессе индивидуального развития системных свойств клетки слабо выраженные вначале некоторые ее свойства могут усилиться и взять на себя основную ее функциональную нагрузку в соответствующем органе. Таким образом, процессы диффе-

ренциации и структурно-функциональной специализации порождаемых в организме клеток лежат в основе адаптивного функционирования целостного организма.

В процессе функционирования клетка в организме может исчерпать свои возможности к обновлению и поддержанию собственной структурно-функциональной специфичности, подвергнуться деградациии, разложению и удалению из организма по механизмам обмена с окружающей средой.

Таким образом, в случае клетки как организационной и структурно-функциональной основы биологической деятельности тканей, органов и организма в целом [3] можно вычлениить дис изменений, имеющих адаптивный характер, причем в данном случае переплетаются адаптация клетки в условиях организма и приспособление организма к среде. Приспособление организма в онтогенетическом плане начинается с порождения новой клетки. Организация ее взаимодействий с другими клетками и средой приводит к развитию системных свойств клетки, т. е. к приспособлению самой клетки в организме. Исчерпание ресурсов приспособления и репаративной функции по восстановлению поврежденных основных клеточных компонентов приводит к старению, деструкции и элиминации клетки из организма.

Рассмотрим содержание действий и изменений, относящихся к животному или человеку как к элементу некоторой экологической группы или социального коллектива в различные фиксированные периоды его развития и функционирования. Вопрос о фиксации начала отсчета собственно человеческого факта здесь не имеет значения. Мы можем взять в качестве исходной позиции, например, рождение как бесспорно фиксированный момент его онтогенеза. Качественный скачок его развития здесь характеризуется изменением способа обмена со средой и существенным изменением самой среды. В известном смысле из организма матери он превращается в самостоятельный организм. Внедренная среда материнского организма заменяется качественной новой средой. Вещественно-энергетический обмен поворождаемого организма со средой сопровождается развитием его органов и функциональных систем в целостную автономную биологическую структуру.

Информационный обмен организма со средой через системно-гностических рецепторов и специализированных эффекторных служящих для информационного воздействия на среду, приводит к развитию соответствующих способностей восприятия, обработки и выдачи информации, а также для управления приспособительным поведением на информационной основе. На этом уровне развития под действием системы восприятия и обучения формируются упорядоченные системы поведенческих актов приспособительного взаимодействия организма со средой. Каждое из таких систем выражается в форме определенных ролевых

функций — семейных, производственных и других социальных отношений.

Сформировавшиеся системы ролей и навыков позволяют человеку получать определенные полезные результаты своего взаимодействия со средой, в том числе и социальной по своей природе. Через эти результаты человек автоматически включается в социальные коллективы различного назначения. Таким образом, этап фиксации определенного состава ролей является качественным скачком в онтогенезе организма, так как переводит его на следующую уровень организации системы — из системы формирующейся в систему производящую. В реальности эти системы существенно пересекаются, но для данного анализа более существенна констатация факта различия.

В силу различных причин естественного порядка каждый член коллектива принимает конечное время участия в его работе с данной ролевой функцией. Через определенное время может показаться, например, что все члены первоначального коллектива были постепенно заменены новыми с такими же или трансформированными в связи с новой технологией ролевыми функциями.

Таким образом, в случае организма как элемента коллектива или биологического сообщества мы имеем несколько фиксированных уровней его онтогенеза — рождение, организацию в первичных или начальных структурах, обучение, развитие и созревание, старение и элиминация из коллектива или сообщества.

Любой социальный коллектив характеризуется прежде всего некоторым целостным результатом, получаемым как совокупный продукт деятельности его членов по преобразованию предметов труда — вещества, энергии и информации.

Приспособительные изменения в деятельности коллектива направлены, как правило, на повышение эффективности производства и качества его результатов. Эти изменения достигаются благодаря поиску, выбору, изготовлению средств и предметов производства, благодаря совершенствованию навыков, изменению технологии и организации производства. Достижение приемлемой эффективности производства и качества продукции позволяет данному коллективу вступить в социальные отношения на уровне межорганизационных связей, т. е. с другими производителями ценностей для эквивалентного обмена. Этот акт способствует дальнейшему повышению производительности труда за счет увеличения специализации уже на групповом уровне. Рождение данного коллектива в некоторую коалицию необходимо сопровождается его перестройкой, изменениями в составе организации. В результате выполнения своей функции в обществе данный коллектив может быть распущен или трансформирован в коллектив с другим назначением.

Таким образом, на уровне социальных организаций их приспособление достигается за счет формирования новых производственных коллективов, их организации, развития и расформирования, роспуска в случае выполнения ими социальных функций. Порождаемые социальными организациями ценности расширяют и стабилизируют условия жизнедеятельности на различных уровнях организации самоорганизующихся систем естественного происхождения.

Итак, на каждом из рассмотренных эволюционных уровней ЕСС мы можем говорить об одной и той же по форме схеме жизнедеятельности их элементов. Порождение, поиск, выживание, размножение и т. п. элементов на различных уровнях организации ЕСС следует рассматривать как одну из форм приспособления предыдущего в эволюционном отношении уровня. Этот способ адаптации позволяет одновременно и непрерывно испытывать и осваивать все существующие условия среды. Особенно эффективен в случае нестационарных условий, когда предыдущие поколения изменяют результатами жизнедеятельности среду, в которой они развивались, и тем самым исключают возможность развития у будущих поколений системных свойств, аналогичных собственным.

Сразу же после рождения новый организм или элемент попадает в условия взаимодействия со средой. Установление системы воздействий на него со стороны среды и действий организма на элементы среды определяет содержание процесса организации. Организация как процесс и результат взаимодействия нового организма со средой определяет ту систему условий, в которой он начинает свою жизнедеятельность.

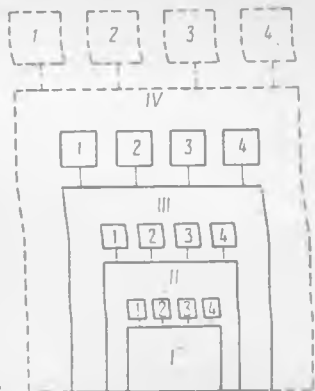
Под действием условий среды, которые он получает в результате организации, происходит развитие определенных свойств, окончательно определяющих множество возможных отношений нового организма со средой.

На систему организм — среда на всех ступенях их взаимоотношений непрерывно действуют процессы энтропийного характера, дезорганизующие, разлагающие и разрушающие. В результате этих процессов все элементы системы стремятся к равновесным состояниям, когда упорядоченные отношения переходят в хаотические. Условия, приводящие элемент к таким отношениям со средой, в том числе и с другими элементами, неизбежно приводят к исключению его из системы.

Генетически, эволюционно каждый следующий уровень выживает в результате развития предыдущих, причем первые выжили во вторые в качестве их элементной основы. Жизнеспособными оказывались такие отношения между уровнями, когда предыдущих устанавливалось по меньшей мере равновесие между процессами размножения, организации, развития и сохранения, с одной стороны, и разрушением, деградацией — с другой. Эти устойчивые соотношения и обеспечивают существование

ние следующего уровня. В свою очередь аналогичные отношения на следующем уровне, образованном элементами предыдущего, обеспечивают существование системы с более высоким уровнем организации и т. д.

Способы адаптивного функционирования ЕСС и отношения между различными уровнями их организации можно представить в виде следующей обобщенной схемы (см. рисунок): различные уровни I, II, III, IV и т. д. адаптивной ЕСС порождают (1) элементы, организуют (2) их в функционирующих структурах, где в процессе взаимодействия существующей структуры с новыми элементами у последних развиваются (3) системные свойства, что обеспечивает окончательное формирование структуры данного уровня в текущих условиях. Разрушением и устранением (4) отработанных и малоэффективных элементов достигается минимизация и экономичность структур различных уровней организации.



В реальных ЕСС эти уровни и результаты их функционирования пересекаются и интегрируются в совокупных результатах жизнедеятельности и адаптации. Последняя представляется как система параллельно действующих элементарных процессов порождения, организации, развития и элиминации. Сочетание результатов этих процессов по интенсивности, пространственным и временным характеристикам и проявлениям в процессе взаимодействия данной системы с другими и определяет общую картину адаптации целостной системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аптер М. Кибернетика и развитие. М., «Мир», 1970. 216 с.
2. Марченко С. Ф. Бионические аспекты анализа элементов самоорганизующихся систем.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 17, Харьков, 1976, с. 26—40.
3. Леви А., Сикевич Ф. Структура и функция клетки. М., «Мир», 1971. 584 с.

Поступила 5 марта 1977 г.

УДК 612.8.001.57

В. М. КИСЕЛЕВ, В. П. РОМАНОВ

#### ВЫБОР И ОЦЕНКА АЛФАВИТА ПРИ ЭФФЕКТИВНОМ КОДИРОВАНИИ ШТРИХОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При создании технических систем автоматического анализа изображений приходится решать задачи, имеющие общие аспекты с механизмами восприятия, кодирования и хранения зрительных образов в биологических системах [1, 2].

Одним из широких классов графической информации, который используют при исследовании механизмов восприятия человека и при разработке устройств распознавания, кодирования ввода в ЭЦВМ, является класс штриховых изображений из контурной графической информации. В нем можно выделить группу структурных графических образов, имеющих не столько иллюстративные, сколько семантические функции. К ним относятся: машиностроительные чертежи, радиоэлектронные схемы (блочные, функциональные и принципиальные), а также графы (сетевые, например, сетевой график), условно отображающие последовательность выполнения различных процессов.

В указанной группе штриховых изображений в зависимости от конкретного подмножества данных можно выделить конечный набор элементарных форм кривых, так называемый «графический алфавит»:  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ . Оперируя его элементами по синтаксическим правилам грамматики получают формализованное описание графического образа с целью его ввода и хранения в памяти ЭЦВМ.

Согласно имеющимся результатам исследований [3] в биологических системах восприятия зрительной информации действует аналогичный механизм: рецептивные поля сетчатки, получая сигналы от лежащих выше отделов зрительной системы перестраиваются в специализированные поля для выделения простейших графических форм (отрезков прямых линий различной ориентации, дуг, углов и других конфигураций).

Есть основания считать, что зрительный образ структурного графического изображения хранится в памяти человека не в виде одномерной последовательности встречающихся при восприятии графических элементов, а крупными блоками этих элементов или фрагментами с зафиксированными логическими связями между ними. Действительно, мы воспринимаем не просто некоторое формальное перечисление структурных графических элементов, а отдельные образы, характеризующие определенные понятия: машиностроительная деталь, элемент радиоэлектронной схемы (диод, конденсатор, транзистор, триггер и т. д.).

Вместе с тем известно, что начиная с определенного момента последовательного предъявления элементов или фрагментов изображения (т. е. при накоплении определенной статистики) действуют механизмы предсказания: зная соседние предшествующие элементы или их частичные последовательности, можно с достоверностью предсказывать последующие.

В пользу статистического кодирования свидетельствует тот факт, что если бы система зрительного восприятия работала так же, как, например, запоминающая телевизионная трубка и устройство записи на магнитной ленте, то вся емкость памяти при его значительных ресурсах была бы израсходована на приходящие зрительные сообщения в течение нескольких минут.

Действительные механизмы статистического кодирования зрительных образов в коре головного мозга далеко еще не изучены, но их наличие, судя по косвенным наблюдениям, не подлежит сомнению. Поэтому создание статистических моделей восприятия и подход к их изучению с точки зрения теории информации и эффективного кодирования является правоммерным и оправданным.

При кодировании штриховых изображений одним из методов «сжатия» или экономного представления данных может служить кодирование блоками или фрагментами, т. е. устойчивыми сочетаниями последовательностей элементов графического алфавита.

Рассмотрим укрупненный алфавит  $G^n = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m^n\}$ , элементами которого являются графические конфигурации  $\Phi_i$  длины  $n$  в алфавите  $G$ .

Если предположить, что при последовательном восприятии элементов алфавита  $G$  вероятности появления этих элементов  $P(g_i) = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  статистически независимы, то каждый фрагмент длины  $n$   $\Phi_i = g_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } g_{in}$ , где знак and фиксирует вид связи между соседними элементами, встречается с вероятностью

$$P(\Phi_i) = p_{i1} p_{i2} \dots p_{in}. \quad (1)$$

Обозначим полное распределение вероятностей фрагментов длины  $n$  через  $P^n$ .

В соответствии с работой [4] количественная оценка эффективности кодирования равна среднему числу двоичных символов, приходящихся при блочном кодировании на один элемент алфавита  $G^n$ , т. е. на  $n$  элементов алфавита  $G$ . Поэтому стоимость кодирования фрагментами длины  $n$  целесообразно оценивать величиной

$$L_n(P) = \frac{1}{n} L(P^n). \quad (2)$$

Как показал Шеннон [4],

$$\sum_{i=1}^m p_i \log_2 \frac{1}{p_i} \leq L_n(P) \leq \sum_{i=1}^m p_i \log_2 \frac{1}{p_i} + \frac{1}{n} \quad (3)$$

и в пределе при  $n \rightarrow \infty$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_n(P) = \sum_{i=1}^m p_i \log_2 \frac{1}{p_i} = H, \quad (4)$$

т. е. операция укрупнения фрагментов приводит к эффективному кодированию.

Увеличение количества укрупняемых графических конфигураций (цели, циклы, графы) одновременно с ростом алфавита  $G^n$  приводит к все большей декорреляции фрагментов — блоков. Увеличение числа  $n$  элементов в блоках уменьшает степень корреляционной связи между блоками [5], что позволяет считать их статистически независимыми. Укрупнение возможно равномерное

и неравномерное (кодирование фрагментами различной длины с сохранением исходного графического алфавита  $G$ ).

Выбор и поиск фрагментов, т. е. оптимального алфавита счисления штриховых изображений, осуществляющего эффективное кодирование, — довольно сложная задача. Для этой цели целесообразно использовать математический аппарат марковских цепей и некоторые положения комбинаторики.

Последовательный характер восприятия графических элементов штрихового изображения позволяет ввести условную вероятность  $p_{\alpha\beta}$  перехода от графического элемента  $g_\alpha$  к элементу

Статистические связи всех графических элементов алфавита задаются в виде стохастической матрицы переходных вероятностей

$$Mt(p_{\alpha\beta}) = \begin{matrix} & \begin{matrix} g_1 & g_2 & \dots & g_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \end{matrix} & \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mm} \end{vmatrix} \end{matrix}$$

При этом отдельные вероятности  $p_{\alpha\beta}$  могут быть равны нулю, что означает: в данном графическом образе парная конфигурация  $g_\alpha$  and  $g_\beta$  или последовательный переход  $g_\alpha \rightarrow g_\beta$  являются запрещенными. Сумма элементов каждой строки матрицы равна единице.

Стохастическая матрица  $Mt(p_{\alpha\beta})$  вместе с начальным распределением  $P(g_i)$  и синтаксическими правилами сопряжения элементов вполне определяет статистические и структурные свойства последовательно воспринимаемого графического образа.

При поиске в изображении фрагментов с вероятностями появления, близкими к максимальным, можно использовать следующие зависимости между вероятностями перехода за  $k$  шагов начального элемента  $g_\alpha$  фрагмента к конечному  $g_\beta$  через промежуточные  $g_{\gamma_1}, g_{\gamma_2}, \dots, g_{\gamma_{k-1}}$ , которые вытекают из теоремы умножения вероятностей [6]:

$$\sum_{\beta} p_{\alpha\beta}^{(k)} = 1,$$

$$p_{\alpha\beta}^{(k+1)} = \sum_{\gamma} p_{\alpha\gamma}^{(k)} p_{\gamma\beta} = \sum_{\gamma} p_{\alpha\beta} p_{\gamma\beta}^{(k)},$$

$$p_{\alpha\beta}^{(l+m)} = \sum_{\gamma} p_{\gamma\alpha}^{(l)} p_{\gamma\beta}^{(m)} = \sum_{\gamma} p_{\alpha\gamma}^{(m)} p_{\gamma\beta}^{(l)} = p_{\alpha\beta}^{(m+l)},$$

где  $\alpha = 1, 2, \dots, n$ , а  $m$  и  $l$  — любые целые неотрицательные числа.

Из равенств (7) вытекает соотношение

$$p_{\alpha\beta}^{(k)} = \sum_{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{k-1}} p_{\alpha\gamma_1} p_{\gamma_1\gamma_2} \dots p_{\gamma_{k-1}\beta}$$

в котором суммирование производится от 1 до  $n$  и для каждого из значений  $\gamma_i$  независимо.

Использование соотношений (7)—(9) позволяет вычислять условные вероятности существования в изображении фрагментов длиной  $k$  и отбирать среди них конфигурации, обладающие наибольшей вероятностью. Переходные вероятности  $p_{\alpha\beta}^{(k)}$  являются элементами  $k$ -й степени матрицы  $P$ , т. е.  $Ml(p_{\alpha\beta}^{(k)}) = P^k$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$

Как показано в [6], возможно аналитическое представление переходных вероятностей  $p_{\alpha\beta}^{(k)}$  через корни  $\lambda_i$  матрицы  $P$  и миноры ее характеристического определителя  $P(\lambda)$ . Это позволяет сократить время поиска фрагментов с наибольшей частотой повторения при реализации алгоритма отбора фрагментов на ЭЦВМ путем исключения полного перебора всех возможных комбинаций в исходном описании.

Для данной задачи возможно также применение цепей Маркова—Брунса [6], согласно которым образуются  $r$ -членные комбинации элементов, имеющие в начале или в конце общие элементы, а также составляется разностное уравнение и находятся его корни, которые позволяют оценить статистические характеристики возможных комбинаций элементов.

Блок-схема алгоритма поиска и отбора фрагментов, т. е. элементов алфавита  $G^i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), приведена на рисунке. На основе исходного графического алфавита  $G$  и некоторой грамматики составляется формализованное описание штрихового изображения. В блоке  $P1$  устанавливается начальное распределение  $P(g_i)$  элементов алфавита  $G$ . В блоке  $P2$  составляется матрица  $Ml(p_{\alpha\beta}^{(k)})$  переходов ( $g_\alpha^{(k)} \rightarrow g_\beta$ ,  $\Phi_\alpha^{(k)} \rightarrow \Phi_\beta$ ,  $g_\alpha^{(k)} \rightarrow \Phi_\beta$ ,  $\Phi_\alpha^{(k)} \rightarrow g_\beta$ ), где  $k$  указывает число последовательных шагов при соответствующих переходах (от элемента к элементу, от фрагмента к фрагменту и т. д.).

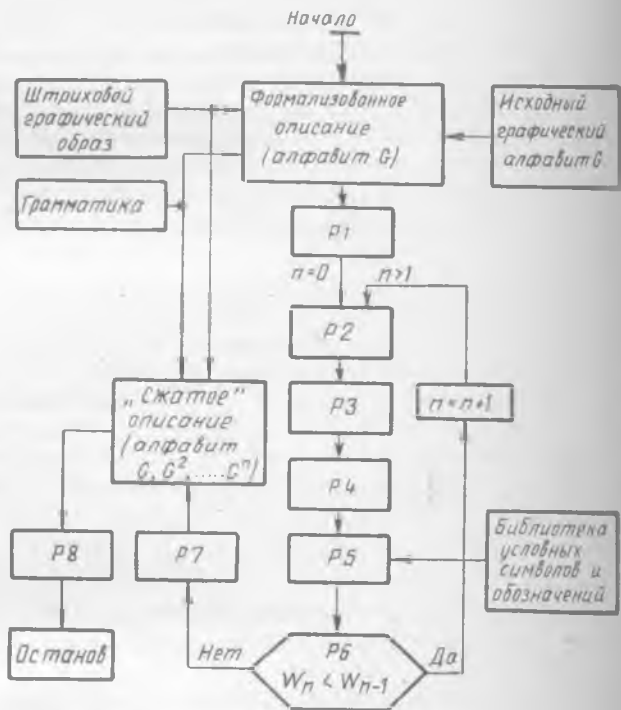
В блоке  $P3$  осуществляется упорядочение элементов матрицы по весовому признаку, т. е. элементы с наибольшей условной вероятностью помещаются в начале рабочего массива. Блок  $P4$  проверяет степень корреляционных связей (смежность и пересечение) фрагментов, начиная с первого в упорядоченном массиве, и исключают из дальнейшего рассмотрения смежные или пересекающиеся с предыдущим, если их условная вероятность невелика.

После такого «отсева» остаются только фрагменты, удовлетворяющие требованию допустимо минимального значения условной вероятности и некоррелированные между собой. Затем осуществляется переход на блок  $P5$ , в котором частичным описаниям отобранных фрагментов присваивается условный символ или обозначение из соответствующей библиотеки символов, обладающие более короткими кодовыми комбинациями.

На каждом цикле  $n$  поиска и отбора фрагментов производится вычисление критерия оптимизации

$$W_n = f(Q_{\text{опис}}, Q_{\text{алф}}^{1, 2, \dots, n}),$$

являющегося функцией длин «сжатого» описания и смешанного алфавита  $G^1, G^2, \dots, G^n$ , объем которого непрерывно возрастает. При определенном  $n$  условие оптимизации  $W_n < W_{n-1}$  перестает выполняться (оператор  $P_6$ ); производится запись результатов отбора в библиотеку фрагментов (блок  $P_7$ ).



Блок-схема алгоритма:  $P_1$  — блок накопления статистики  $P(g_i)$ ;  $P_2$  — блок формирования матрицы  $Mt(p_{\alpha\beta}^{(k)})$ ;  $P_3$  — блок упорядочения  $p_{\alpha\beta}^{(k)}$ ;  $P_4$  — блок отбора;  $P_5$  — блок перекодировки;  $P_6$  — оператор проверки условия  $W_n < W_{n-1}$ ;  $P_7$  — блок записи в библиотеку фрагментов;  $P_8$  — блок вычисления  $K_{\text{сж}}$ .

Используя полученный алфавит, содержащий элементы исходного графического алфавита  $G$  и фрагменты различной длины, составляют окончательный вид «сжатого» описания, после которого производят оценку коэффициента сжатия

$$k_{\text{сж}} = \frac{W_1}{W_n}$$

и останов.

Результаты применения описанного алгоритма поиска и отбора алфавита к описаниям штриховых изображений типа электронных схем показывают, что зависимости  $Q_{\text{опис}} = \varphi(n)$  и  $Q_{\text{алф}} = \psi(n)$  являются соответственно падающей и возрастающей монотонными зависимостями и на некотором шаге  $n$  функционал (10) достигает своего минимального значения, что соответствует максимуму  $k_{\text{сж}}$ .

Коэффициент сжатия зависит от вида критерия оптимизации (10), в который могут вводиться различные параметры, характеризующие ресурсы ЭЦВМ (объем памяти), быстродействие и сходимость алгоритма, а также степень сложности реконструкции (восстановления) исходного изображения по «сжатому» описанию. По отношению к исходному графическому алфавиту, который обычно выбирается на основе эвристических посылок, расширенный и укрупненный алфавит, полученный с помощью рассмотренного алгоритма, позволяет использовать статистические свойства изображений для их эффективного кодирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов В. П. Преобразование изображений в одной модели непрерывной нейронной сети.— «НТИ», 1963, № 2, с. 36—41.
2. Романов В. П. Применение двумерной фильтрации для повышения надежности автоматического чтения.— «НТИ», 1964, № 7, с. 24—29.
3. Глезер В. Д. Механизмы опознания зрительных образов. М., «Наука», 1966, с. 3—104.
4. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М., ИЛ, 1963, с. 243—332.
5. Новик Д. А. Эффективное кодирование. М., «Энергия», 1965, с. 69—94.
6. Романовский В. И. Дискретные цепи Маркова. М., Гостехиздат, 1949, с. 9—45, 303—361.

*Поступила 6 июля 1975 г.*

УДК 62.506.2

Г. В. АЛЕШИН, канд. техн. наук, В. А. ГРАБИНА, канд. техн. наук

#### ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ КОНТРАСТИРОВАНИЯ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Эффект оконтуривания изображений широко отображен в литературе [1—4]. Тем не менее необходимо уточнить его основные свойства и некоторые критерии качества контрастирования контуров. Рассмотрим, какое из известных математических описаний эффекта оконтуривания достаточно полно описывает явление контрастирования контуров.

Свойство глаза подчеркивать (выделять) контур изображения объясняется, как известно, наличием тормозных (латеральных) взаимодействий между элементами рецептивного поля сетчатки [1]. Наличие этого бокового латерального торможения в одном

слое нейронов приводит к следующему отклику канала с номером  $l$ :

$$F_l = 2f_l - \sum_{i=1}^n f_i \varphi_{l-i} \quad (1)$$

Здесь  $n$  — число каналов;  $l$  — номер канала  $l \in (0, n)$ ;  $f_l$  — светлота входного изображения в  $l$ -м канале или его приращение в  $l$ -м канале;  $\varphi_i$  — весовая функция взаимной прямой связи между каналами;  $i$  — индекс суммирования, характеризующий сдвиг

Если максимальную апертуру рецептора  $\Delta X_{1\max}$  и максимальный интервал между соседними рецепторами  $\Delta X_{2\max}$  устремить к нулю, сохраняя взаимные связи (1), и с учетом стремления числа рецепторов в бесконечности при заданном размере

поля рецепторов  $D_x = \sum_{i=0}^n (\Delta X_{1i} + \Delta X_{2i})$ , то получим непрерывный аналог одномерного поля рецепторов с обработкой:

$$F(X) = f(X) - \int_0^{D_x} f(X_1) \varphi(X - X_1) dX_1, \quad (2)$$

где интеграл берется по заданному раскрытию рецептивного поля  $[0, D_x]$  либо в бесконечных пределах для непрерывного неограниченного аналога выражения (2).

Известные [1—4] математические описания контрастирования контуров изображений с точки зрения существа эффекта в некотором смысле адекватны (см., например, [2]). В дискретной форме, близкой к (1), описание контрастирования встречается у Ratliff F. и Hartline H. K. [1]. Впервые же эффект контрастирования контуров изображений был количественно описан Э. Махом (E. Mach, 1865) [1, 2]:

$$F(X) = a \lg \left\{ \frac{f(X)}{b} \pm \frac{c}{f(X)} [f''(X)]^2 \right\}, \quad (3)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — постоянные.

Нелинейность вида  $\lg$  описывает эффект типа насыщения, например выцветание родопсина в рецепторах, предельные энергетические возможности нейронов. При контрастировании контуров в (3) характерен знак «—».

Для одномерной весовой функции  $\varphi(X)$  выражения (2)

$$\varphi(X) = k_1 \delta(X) + k_2 \delta^1(X) + k_3 \delta^{11}(X) + \dots \quad (4)$$

эффект контрастирования контуров хорошо изучен [3] и наиболее выражен при  $k_2 \cong 0$ ,  $k_3 < 0$  и  $|k_3| \ll k_1$ . В этом случае для одномерного варианта

$$F(X) = k_1 f(X) - |k_3| f''(X), \quad (5)$$

что достаточно близко к (3) и к представлениям о контрастировании контуров, сложившимся в телевидении (3).

Описание эффекта Ггу представлял в виде

$$F(X, Y) = \lg \frac{af(X, Y)}{1 + bV(X, Y)}, \quad (6)$$

где

$$V(X, Y) = \iint f(X, Y) \exp\left(-\frac{X^2}{\sigma_X^2} - \frac{Y^2}{\sigma_Y^2}\right). \quad (6a)$$

Поскольку, как будет следовать из формулы (17),  $bV$  должно быть меньше единицы, то

$$F(X) \approx \lg \left\{ af(X, Y) \left[ 1 - bV(X, Y) + \frac{b^2}{2} V^2(X, Y) - \dots \right] \right\}. \quad (7)$$

Очевидно, что при гауссовой аппроксимации  $\varphi(X, Y)$  в формуле (6a) выражение в фигурных скобках (7) существенно согласуется с уравнением (2). К аналогичным выводам приводит описание эффекта контрастирования по типу «шунтирования» [1]. В форме (2) описание эффекта впервые упоминалось, по-видимому, у Huggins и Licklider [1], Bekesy [1, 2] и др.

Таким образом, нелинейность функций  $F(X)$  в выражениях (3), (6) описывает лишь такие сопутствующие эффекты, как автоматическая регулировка зрачком средней интенсивности, или светлоты,  $f_{cp}$  поля  $f(X)$  при обработке изображений

$$f_{cp} = \frac{1}{D_x} \int_0^{D_x} f(X) dX, \quad (8)$$

эффекты типа «насыщения» и т. п. Эффект же контрастирования контуров достаточно точно описывается линейным процессом в форме (1), (2). Оценим эффект контрастирования линейной системы (2) для функции включения вида

$$f(X) = C_1 + C_2 1(X - X_0). \quad (9)$$

Здесь  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные;  $1(X)$  — единичная функция включения при  $X = 0$ .

Назовем  $k$  параметром контрастирования, а  $\Delta X_\varphi$  — эффективной шириной весовой функции связи  $\varphi(X)$ :

$$k = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(X) dX, \quad (10)$$

$$\Delta X_\varphi = \frac{1}{\varphi(0)} \int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(X)| dX. \quad (11)$$

Тогда

$$\begin{aligned} F(X) &= C_1(1 - k) + C_2 \left[ 1(X - X_0) - \int_{-\infty}^{X - X_0} \varphi(X_1) dX_1 \right] = \\ &= C_1(1 - k) + C_2 [1(X - X_0) - \Phi(X - X_0)], \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\Phi(X) = \int_{-\infty}^X \varphi(X_1) dX_1$ . Будем предполагать  $\varphi(X)$  четной функцией и монотонно спадающей к краям. Четность  $\varphi(X)$  определяется требованием контрастирования контурных линий на границах «свет — тень» и «тьень — свет», что нетрудно увидеть из выражения (12).

Монотонность  $\Phi(X) = \int_{-\infty}^X \varphi(X_1) dX_1$  определяется условием полного отсутствия «многоконтурности», или ореола, изображения. А с точки зрения сохранения ширины контурных линий зависящей от эффективной ширины весовой функции  $\varphi(X)$  целесообразно использовать весовую функцию  $\varphi(X)$  с монотонно спадающими краями. Значения выходного эффекта на границе «тьень — свет» со стороны «тьень»  $F(X_{0-})$  и со стороны «свет»  $F(X_{0+})$  определяются из (12):

$$\sup F(X) = F(X_{0+}) = C_1(1-k) + C_2\left(1 - \frac{k}{2}\right); \quad (12)$$

$$\inf F(X) = F(X_{0-}) = C_1(1-k) \mp C_2 \frac{k}{2}.$$

Для областей  $X_2 > X_0 + \frac{\Delta X_{\varphi}}{2}$  и  $X_1 < X_0 - \frac{\Delta X_{\varphi}}{2}$  значения выходного изображения имеют вид

$$F(X_2) = (C_1 + C_2)(1-k); \quad F(X_1) = C_1(1-k).$$

Абсолютные значения выбросов «темной»  $\Delta F(X_{0-})$  и «светлой»  $\Delta F(X_{0+})$  части контуров можно определить из формул (13) и (14)

$$\Delta F(X_{0-}) = \Delta F(X_{0+}) = C_2 \frac{k}{2}.$$

Условие отсутствия искажений типа «негатив», или условие отрицательности выходного изображения можно записать так

$$\inf F(X) - \Delta F(X_{0-}) \geq 0.$$

Из (13) и (15) следует, что при этом

$$k \leq \frac{1}{1 + \frac{C_1}{2C_2}}, \text{ или } k \leq 1.$$

Если оценивать эффект контрастирования контуров общепринятым критерием — контрастностью  $\alpha$ , то для случая (9) можно установить соответственно контрастности входного изображения  $\alpha_{вх}$ , границы «свет — тень»  $\alpha_{гп}$  и выходного изображения  $\alpha_{вых}$ .

$$\alpha_{вх} = \frac{\sup f(X) - \inf f(X)}{\sup f(X) + \inf f(X)} = \frac{1}{1 + \frac{C_1}{C_2}}; \quad \alpha_{гп} = \frac{1}{(1-k)\left(1 + 2\frac{C_1}{C_2}\right)};$$

$$\alpha_{\text{вых}} = \frac{1}{1 + \frac{C_1}{C_2}} \quad (18)$$

Определим степень контрастирования  $\xi$  как относительное увеличение контраста границы «тьень — свет» по сравнению с контрастом изображения вне границы:

$$\xi = \frac{\sigma_{\text{гр}}}{\sigma_{\text{вых}}} = \frac{1 + \frac{C_1}{C_2}}{(1-k) \left(1 + 2 \frac{C_1}{C_2}\right)} \quad (19)$$

Учитывая изложенное и анализируя выражения (2), (9—19), можно сделать следующие выводы.

1. Контрастирующая система представляет собой фильтр, который можно считать линейным с импульсной характеристикой  $\delta(X) - \varphi(X)$ .

2. Весовая функция для улучшения качества контрастирования контуров должна удовлетворять условиям одноmodalности, четности и ограниченности (17). Условие одноmodalности определяется требованием сохранения профиля светлоты границы «тьень — свет». Условие четности следует из того, что система должна одинаково хорошо контрастировать произвольное изображение, в том числе скачки светлоты разного знака. Из условия малых искажений выходного изображения (12) следует, что эффективная ширина весовой функции  $\Delta X_\varphi$  (толщина контурных линий) должна быть близка к разрешаемому элементу  $\Delta X_p$  окончного устройства и удовлетворять требованиям

$$\Delta X_p < \Delta X_\varphi \leq \frac{1}{u_{x \max}} \quad (20)$$

где  $u_{x \max}$  — максимальная пространственная частота (ширина) пространственного спектра изображения  $f(X)$ .

3. Эффект контрастирования усиливается, точнее говоря, не с ростом первой производной, а с ростом скачка светлоты (15) в пределах эффективной ширины весовой функции, а также с ростом параметра контрастирования  $k$  и с уменьшением ширины спектра входного изображения  $u_{x \max}$ , если она достаточно большая. Последнее свойство следует из выражения (12) при входных воздействиях прямоугольной формы.

4. Скачок светлоты на границе «тьень — свет» при контрастировании контуров не меняется. Это следует из (9) и (13):

$$\sup F(X) - \inf F(X) = C_2.$$

Если отсутствует регулирование средней светлоты  $f_{\text{ср}}$  изображения, последняя при  $k \geq 0$  убывает в  $\frac{1}{1-k}$  раз.

5. Степень контрастирования  $\xi$  (19) существенно растет с увеличением параметра контрастирования  $k$ .

Сделанные уточнения в механизме работы систем контрастирования контуров изображений могут оказаться полезными при построении бионических моделей, использующих данный эффект.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ратлиф Ф. Тормозное взаимодействие в элементах сетчатки. — В кн.: Теория связи в сенсорных системах. М., «Мир», 1964, с. 338—354.
2. Путятин Е. П., Сердюченко В. Я. Математические модели явления краевого контраста ахроматического зрения человека. Обзор. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, 1972, с. 15—23.
3. Лебедев Д. В., Цуккерман И. И. Телевидение и теория информации. М., «Энергия», 1965, с. 219.
4. Шабанов-Кушнаренок Ю. П., Сердюченко В. Я. К вопросу моделирования явления краевого контраста. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 2. Харьков, 1969, с. 63.

Поступила 10 февраля 1977

УДК 62.506.2

В. А. ЛОВИЦКИЙ, канд. техн. наук, З. Ю. ШАБАНОВА-КУШНАРЕНКО

#### ОБ ОБРАТИМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

Задачи математического описания процессов языкового поведения человека требуют разработки методов решения логических уравнений<sup>1)</sup>. Особенно ценными были бы аппаратные методы, подобные тем, которые используются в аналоговых вычислительных машинах для решения дифференциальных уравнений. Однако разработке аппаратных методов решения логических уравнений препятствует необратимость действия существующих комбинационных схем. Нужны *обратимые логические элементы* типа инвертора, совпадения, разделения, из которых можно было бы собирать специальные комбинационные схемы для решения логических уравнений. В статье предпринята попытка построить такие обратимые логические элементы.

Построим *обратимый элемент совпадения*, осуществляющий решение логического уравнения

$$z = x \wedge y.$$

Обратимый элемент совпадения будем схематически изображать так, как показано на рис. 1, а. В отличие от обычного элемента совпадения, при полюсах обратимого элемента отсутствуют стрелки. Этим подчеркивается то обстоятельство, что

<sup>1)</sup> Шабанов-Кушнаренок Ю. П. Применение метода нуль-органов в лингвистике. См. статью в настоящем сборнике.

теперь сигналы можно подавать не только на полюсы  $x$ ,  $y$ , но также и на полюс  $z$ , снимать же сигналы можно теперь не только с полюса  $z$ , но также и с полюсов  $x$ ,  $y$ . Каждый полюс совмещает в себе оба канала передачи информации о значении переменной — как входной, так и выходной (рис. 2, а). Обозначим входную информацию о значениях переменных  $x, y, z$  соответственно через  $x_1, y_1, z_1$ , а выходную информацию о них — через  $x_2, y_2, z_2$ . Таким образом, обратимый элемент совпадения можно представить в виде преобразователя информации, имеющего три выхода и три входа (рис. 2, б).

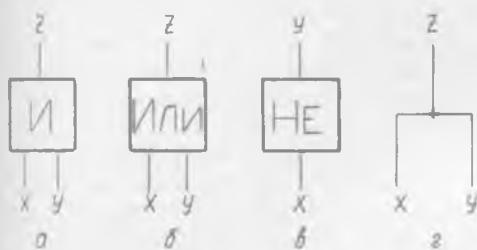


Рис. 1.

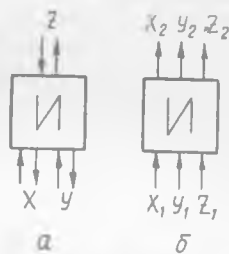


Рис. 2.

Рассмотрим, что представляют собой переменные  $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$ . Было бы ошибкой полагать, что эти переменные, так же, как и переменные  $x, y, z$ , принимают только значения 0 и 1. Приходится принять, что область изменения этих переменных содержит четыре значения, которые мы обозначим символами 0, 1, ?, 1. Это диктуется следующими соображениями. При решении уравнения (1) значения некоторых переменных из числа переменных  $x, y, z$  могут быть заданы, а значения остальных переменных — не заданы. Например, пусть задано, что  $x = 1$  и  $z = 1$ , значение же переменной  $y$  неизвестно, и его нужно определить в результате решения уравнения (1). Всю эту информацию нужно ввести в элемент совпадения, и это можно сделать, положив  $x_1 = 1, y_1 = ?, z_1 = 1$ . В результате решения уравнения (1) обратимый элемент совпадения должен определить значение переменной  $y = 1$ , сформировав на своем среднем выходном канале сигнал  $y_2 = 1$ . Естественно принять, чтобы на левом и правом выходных каналах обратимый элемент просто продублировал заданные значения переменных  $x$  и  $z$  и сформировал сигналы  $x_2 = 1$  и  $z_2 = 1$ .

Рассмотрим другой пример. Пусть задано  $x = 0, z = 0$  и требуется отыскать значение переменной  $y$ , удовлетворяющее уравнению (1). Уравнение имеет два решения 0 и 1, значение переменной  $y$  остается неопределенным, поэтому полагаем, что в этом случае элемент совпадения выработает на среднем выходе сигнал  $y_2 = ?$ . Если же задано  $x = 0$  и  $z = 1$ , то ясно, что в этом случае решения для  $y$  не существует, а исходные данные несов-

местимы. В этом случае полагаем, что на своем среднем выходе обратимый элемент совпадения выработает сигнал  $y_2 = 1$ . Дублировать значения сигналов  $x_1 = 0$  и  $z_1 = 1$  на выходах элемента было бы неправильно, поскольку это наводило бы на мысль, что заданные значения  $x = 0$  и  $z = 1$  допускаются уравнением (1), а это не так. Поэтому полагаем, что сигналы  $x_2$  и  $z_2$  также принимают значение 1.

Случай, когда какой-то из входных сигналов  $x_1, y_1, z_1$  элемента принимает значение 1, следует считать возможным; это означает, что информация, поступающая на входы обратимого элемента совпадения (например, от какого-то другого элемента комбинационной схемы), противоречива. В этом случае не имеет смысла производить определение значений переменных  $x, y, z$  из уравнения (1), поэтому полагаем, что элемент вырабатывает значение 1 по всем трем выходным каналам:  $x_2 = 1, y_2 = 1, z_2 = 1$ .

Рассмотренные примеры приводят нас к следующей интерпретации переменных  $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$  и их значений: символы  $x_1, y_1, z_1$  обозначают исходную информацию о значениях переменных  $x, y, z$ ; символы  $x_2, y_2, z_2$  обозначают информацию о значениях  $x, y, z$ , полученную в результате решения уравнения (1); значения 0 и 1 означают, что соответствующая переменная уравнения (1) равна соответственно 0 и 1; значение ? говорит о том, что значение переменной уравнения (1) неизвестно, а знак ! — о том, что это значение не существует.

Исходя из этой интерпретации, построим следующий алгоритм работы обратимого элемента совпадения:

- 1 шаг. Если  $x_1 = 1$  или  $y_1 = 1$ , или  $z_1 = 1$ , или  $x_1 = 1$  и  $(x_1 = 0$  или  $y_1 = 0)$ , или  $z_1 = 0$  и  $x_1 = y_1 = 1$ , то  $x_2 = y_2 = z_2 = 1$ .
- 2 шаг. Если  $x_1 = 0$  или  $y_1 = 0$ , то  $x_2 = x_1, y_2 = y_1, z_2 = 1$ .
- 3 шаг. Если  $x_1 = y_1 = 1$  или  $z_1 = 1$ , то  $x_2 = y_2 = z_2 = 1$ .
- 4 шаг. Если  $x_1 = 1$  и  $z_1 = 0$ , то  $x_2 = 1, y_2 = z_2 = 0$ .
- 5 шаг. Если  $y_1 = 1$  и  $z_1 = 0$ , то  $y_2 = 1, x_2 = z_2 = 0$ .
- 6 шаг. В остальных случаях  $x_2 = x_1, y_2 = y_1, z_2 = z_1$ .

Обратимый элемент совпадения должен быть сконструирован так, чтобы он своим функционированием реализовал алфавитный оператор, соответствующий приведенному выше алгоритму. Этот элемент может быть построен в виде обычной комбинационной схемы, если перейти к двоичному кодированию символов 0, 1, ?. Принимаем следующий способ кодирования:  $0 = \langle 1, 0 \rangle$ ,  $1 = \langle 0, 1 \rangle$ ,  $? = \langle 0, 0 \rangle$ . Вводим новые обозначения для разрядов кода  $x_i = \langle x'_i, x''_i \rangle$ ,  $y_i = \langle y'_i, y''_i \rangle$ ,  $z_i = \langle z'_i, z''_i \rangle$ ,  $i = 1, 2$ . Комбинационная схема, реализующая обратимый элемент совпадения при этом способе кодирования, может быть описана следующей системой равенств:

$$\begin{aligned} x_2 &= x'_1 \vee (y_1 \vee z'_1)(y'_1 \vee z''_1); & x_2 &= x''_1 \vee z'_1 \vee y'_1 y''_1; \\ y_2 &= y_1 \vee (x_1 \vee z'_1)(x'_1 \vee z''_1); & y_2 &= y''_1 \vee z'_1 \vee x'_1 x''_1; \\ z_2 &= x_1 \vee y_1 \vee z'_1; & z_2 &= z'_1 \vee x''_1(x'_1 \vee z'_1) \vee y''_1(y_1 \vee z'_1). \end{aligned}$$

Для реализации схемы требуются 33 диода, т. е. в 16,5 раз больше, чем для построения необратимого элемента совпадения.

Заменяя в формулах (2) верхние индексы при всех буквах ' на " и " на ', получаем формулы, описывающие комбинационную схему, которая реализует *обратимый элемент разделения*, решающий уравнение  $z = x \vee y$ .

Комбинационная схема *обратимого инвертора* для решения уравнения  $y = \bar{x}$  может быть построена на четырех диодах по формулам:

$$x_2 = y_2 = x_1 \vee y_1'; \quad x_2' = y_2' = x_1' \vee y_1. \quad (3)$$

Обратимый элемент разделения и обратимый инвертор будем схематически изображать так, как показано на рис. 1, б, в.

Важно отметить, что узлы, встречающиеся в обратимых комбинационных схемах, в отличие от узлов обычных необратимых схем, представляют собой не простое соединение проводов, а особые преобразователи сигналов. Рассмотрим *обратимый трехлюсный узел* (рис. 1, г), который решает систему уравнений  $x = y = z$ . Его работа при принятом выше способе двоичного кодирования сигналов может быть описана следующей системой равенств:

$$x_2 = y_2 = z_2 = x_1' \vee y_1 \vee z_1, \quad (4)$$

$$x_2' = y_2' = z_2' = x_1 \vee y_1' \vee z_1'$$

Обратимая комбинационная схема, собираемая из рассмотренных выше четырех типов элементов, для решения логического уравнения  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = y$  имеет почти такой же внешний вид, как и обычная необратимая комбинационная схема для реализации функции  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Отличие состоит лишь в том, что на ней не указываются стрелками направления движения сигналов, поскольку теперь сигналы могут двигаться во всевозможных направлениях.

Рассмотрим функционирование такой схемы на примере. Предположим, что нам задано следующее логическое уравнение:

$$\bar{x}_1 (x_2 \vee \bar{x}_3) \vee x_1 x_3 = y. \quad (5)$$

Этому уравнению соответствует обратимая комбинационная схема, изображенная на рис. 3. Схема содержит по два обратимых инвертора, совпадения, разделения и узла. На схеме указаны промежуточные сигналы  $t_1 - t_9$ .



Рис. 3.

Уравнение (5) можно заменить эквивалентной ему системой уравнений, каждое из которых соответствует одному из элементов схемы:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= t_1 = t_7 \text{ (первый узел),} & x_3 &= t_2 = t_8 \text{ (второй узел),} \\
 t_3 &= \bar{t}_1 \text{ (первый инвертор),} & t_4 &= \bar{t}_2 \text{ (второй инвертор),} \\
 t_8 &= t_3 \wedge t_5 \text{ (первое совпадение),} & t_9 &= t_6 \wedge t_7 \text{ (второе совпадение),} \\
 t_5 &= x_2 \vee t_4 \text{ (первое разделение),} & y &= t_8 \vee t_9 \text{ (второе разделение).}
 \end{aligned}$$

Перед началом работы схемы на ее полюсах формируем данные значения переменных (0 или 1), на всех остальных полюсах (в том числе и промежуточных) формируем сигналы. После запуска схемы ее элементы, по мере подхода к ним сигналов, решают соответствующие уравнения и формируют на своих полюсах полученные значения переменных. Эти значения ступают на полюсы различных элементов схемы, снова решаются уравнения и т. д. Процесс решения уравнения продолжается до тех пор, пока не окончатся переходные процессы в цепи схемы и на полюсах схемы установятся стабильные во времени значения переменных. Они и являются решением заданного уравнения.

Пусть, к примеру, задано  $x_2 = 1$ ,  $x_3 = 0$ ,  $y = 1$ . Требуется отыскать значение переменной  $x_1$ , удовлетворяющее уравнению (5). Динамика изменения состояния схемы по тактам в процессе решения ею системы уравнений (6) представлена в таблице. Как видим, обратимая комбинационная схема находит корень  $x_1$  на шестом такте своей работы.

| Номер такта | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $y$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ | $t_4$ | $t_5$ | $t_6$ | $t_7$ | $t_8$ |
|-------------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0           | ?     | 1     | 0     | 1   | ?     | ?     | ?     | ?     | ?     | ?     | ?     | ?     |
| 1           | ?     | 1     | 0     | 1   | ?     | 0     | ?     | ?     | 1     | 0     | ?     | ?     |
| 2           | ?     | 1     | 0     | 1   | ?     | 0     | ?     | 1     | 1     | 0     | ?     | ?     |
| 3           | ?     | 1     | 0     | 1   | ?     | 0     | ?     | 1     | 1     | 0     | ?     | 1     |
| 4           | ?     | 1     | 0     | 1   | ?     | 0     | 1     | 1     | 1     | 0     | ?     | 1     |
| 5           | ?     | 1     | 0     | 1   | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 0     | ?     | 1     |
| 6           | 0     | 1     | 0     | 1   | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     |
| 7           | 0     | 1     | 0     | 1   | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     |

Поступила 20 марта 1977

УДК 612.82.001.57:51

Д. М. КАЛНИБОЛОТСКИЙ, Г. В. ЦЕПКОВ, канд. техн. наук,  
В. П. ШПАКОВСКИЙ, О. Н. ШЕВЕРДА

#### НЕЙРОПОДОБНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИГНАЛОВ

При построении современных электронных систем и устройств обработки данных широко используются известные информационные свойства живых систем. Особое внимание при этом

ляется адаптации, которая в биосистемах играет важную роль в обеспечении гомеостаза, а в технических системах способствует увеличению эффективности функционирования, в частности сокращению избыточности данных.

Однако адаптивность обычно рассматривается с позиций реализации некоторых алгоритмов, предусматривающих приспособительную реакцию устройства (системы) к параметрам возмущающего сигнала, выбранным априорно. Этот недостаток присущ и многочисленным аналогам нервной клетки, которые обладают информационной неполнотой в том смысле, что не обеспечивают адекватного прототипа принципа преобразования входного сигнала, чем, видимо, и объясняется факт их ограниченного распространения в вычислительной и измерительной технике.

Цель настоящей работы — экспериментальное определение электрических параметров сигнала, влияющих на реакцию нервной клетки — простейшей биологической системы обработки информации, получение аналитического описания для адаптации нейрона и синтез на базе этих данных аналого-дискретных преобразователей.

Как известно, любой аналоговый или дискретный сигнал  $x(t)$  будет представлен на выходе нейрона время-импульсным кодом. При этом реакция клетки определяется, главным образом, абсолютным значением амплитуды сигнала и скоростью достижения им порогового уровня  $\theta$ . При малых значениях  $\frac{dx}{dt}$  входное возмущение нейтрализуется действием адаптационного механизма. Классической иллюстрацией эффекта адаптации является реакция нервной клетки на сигнал вида

$$x(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \geq t_0 \\ 0 & \text{при } t < t_0. \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, аналитическое описание для адаптации ( $A$ ) может быть получено путем аппроксимации экспериментальных кривых изменения интервалов между спайками при раздражении нервной клетки сигналами типа уравнения (1).

Эксперимент. В качестве объекта исследования использовался гигантский нейрон виноградной улитки *Helix pomatia*. Генерация нервных импульсов (спайков) вызывалась подачей через микроэлектрод, введенный в сому нейрона сигналов вида (1).

За счет применения мостовой схемы соединения выхода стимулятора со входом усилителя биосигналов отведение последних производилось с помощью того же электрода. Такой способ стимуляции и отведения позволяет минимизировать погрешность при определении интервала между моментами подачи раздражения и начала реакции нейрона (латентного периода) на участке «электрод — клетка». Для регистрации исследуемых про-

цессов использовался двухлучевой осциллограф с фотопресткой.

В экспериментах раздражения одинаковой амплитуды повались на нейрон дважды (две серии экспериментов) с интерлом 2—3 сек. Интервалы между подачей стимулов разной амплитуды составляли 20—30 сек.

Были получены осциллограммы, характер которых показан на рис. 1. Значения межимпульсных интервалов ( $\Delta t_i$ ) и латентных периодов ( $\Delta t_0$ ) при различных значениях раздражающего тока  $I$  измерялись и в относительных единицах использовались при анализе; эти данные приведены в табл. 1, 2.

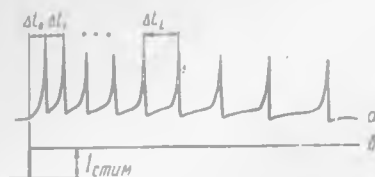


Рис. 1.

Анализ. Кривые изменения межспайковых интервалов  $A$  полученные по данным табл. 1, 2, аппроксимировались [1] различными аналитическими выражениями. Проведенный с помощью ЦВМ анализ зависимости  $A = A(t)$  показал, что наиболее точно она аппроксимируется решением дифференциального уравнения первого порядка:

$$A = m(1 - e^{-\alpha t}).$$

Коэффициенты в выражении (2) являются параметрами нейрона и имеют следующий смысл. Согласно физическим аналогам, коэффициент  $\alpha$  определяет инерционность нейрона и связан с эквивалентными сопротивлениями  $R_n$  и емкостью  $C_n$  нервной клетки соотношением

$$\alpha = \frac{1}{R_n C_n}.$$

Таблица 1

| Ток стимуляции    |                          | Временные интервалы между спайками |              |              |              |              |              |              |              |              |                 |                 |      |
|-------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|------|
| $I \cdot 10^{-9}$ | В относительных единицах | $\Delta t_0$                       | $\Delta t_1$ | $\Delta t_2$ | $\Delta t_3$ | $\Delta t_4$ | $\Delta t_5$ | $\Delta t_6$ | $\Delta t_7$ | $\Delta t_8$ | $\Delta t_{10}$ | $\Delta t_{11}$ |      |
| 2,82              | 12,5                     |                                    |              |              |              |              |              |              |              |              |                 |                 |      |
| 2,93              | 13                       | 11                                 | 30           | 33,5         | 41           | 46,8         | 55           | 68           | 90           | —            | —               | —               |      |
| 3,159             | 14                       | 11,5                               | —            | —            | —            | —            | —            | —            | —            | —            | —               | —               |      |
| 3,265             | 14,5                     | 10,5                               | 2,6          | 30,5         | 33,5         | 39,5         | 45           | 56,5         | 70,8         | —            | —               | —               |      |
| 3,56              | 15,8                     | 10                                 | 27,5         | 31,5         | 36           | 43           | 50           | 62,5         | 82           | —            | —               | —               |      |
| 3,72              | 16,5                     | 9,8                                | 24           | 27           | 29,5         | 33,5         | 38           | 43           | 53           | 65,5         | 105             | —               |      |
| 4,85              | 21,5                     | 7,5                                | 12           | 17           | 20,5         | 22           | 25           | 28           | 34           | 43           | 54              | 76              |      |
| 11,16             | 49,5*                    | 3,5                                | 9,5          | 10,5         | 10,8         | 11,5         | 12,3         | 12,6         | 13           | 13,5         | 14              | 14,7            | 15,3 |

Примечание. Звездочка означает, что импульсная активность окончена.

Таблица 2

| Ток стимуляции | Временные интервалы между спайками |              |              |              |              |
|----------------|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                | $\Delta t_0$                       | $\Delta t_1$ | $\Delta t_2$ | $\Delta t_3$ | $\Delta t_4$ |
| 12,5           | 12,5                               | —            | —            | —            | —            |
| 13             | 12                                 | 32           | 36,5         | 42,8         | 49           |
| 14             | 12,3                               | —            | —            | —            | —            |
| 14,5*          | 12                                 | 29           | 35,5         | 42           | 51,5         |
| 15,8*          | 13                                 | 32           | 40           | 49           | 59,5         |
| 16,5*          | 11,5                               | 31           | 37           | 44           | 49           |
| 49,5*          | 4,0                                | 11           | 12,5         | 13,5         | 14,5         |

Примечание. Звездочка означает, что импульсная активность не окончена.

Коэффициент  $m$ , очевидно, может служить количественной мерой возбудимости нейрона.

Результаты машинного анализа приведены в табл. 3. Средне-квадратичная погрешность аппроксимации  $x$  вычислялась по формуле

$$x = \frac{\sqrt{n \sum_{i=1}^n (A_i - \hat{A}_i)^2}}{\sum_{i=1}^n A_i} 100\%$$

где  $n$  — число точек (спайков), в которых подсчитывалась погрешность;  $A_i, \hat{A}_i$  — соответственно экспериментальное и расчетное значения кривых в момент появления  $i$ -го спайка.

Таблица 3

| Ток стимуляции | Первая серия экспериментов |       |       |     |       |            | Вторая серия экспериментов |       |       |     |       |            |
|----------------|----------------------------|-------|-------|-----|-------|------------|----------------------------|-------|-------|-----|-------|------------|
|                | $E_1$                      | $E_2$ | $E_3$ | $C$ | $-a$  | $\epsilon$ | $E_1$                      | $E_2$ | $E_3$ | $C$ | $-a$  | $\epsilon$ |
| 12,5           | 125                        | 500   | —     | —   | —     | —          | 156                        | —     | —     | —   | —     | —          |
| 13             | 143                        | 390   | 436   | 150 | 0,088 | 2,3        | 156                        | 416   | 475   | 100 | 0,235 | 3,73       |
| 14             | 161                        | —     | —     | —   | —     | —          | 172                        | —     | —     | —   | —     | —          |
| 14,5           | 152                        | 377   | 443   | 100 | 0,12  | 1,757      | 174                        | 420   | 515   | 70  | 0,237 | 0,966      |
| 15,8           | 158                        | 435   | 498   | 100 | 0,136 | 2,441      | 203                        | 505   | 631   | 70  | 0,29  | 1,38       |
| 16,5           | 161                        | 396   | 446   | 150 | 0,066 | 3,93       | 190                        | 511   | 610   | 100 | 0,155 | 1,71       |
| 21,5           | 162                        | 258   | 366   | 100 | 0,66  | 2,675      | —                          | —     | —     | —   | —     | —          |
| 49,5           | 173                        | 470   | 520   | 90  | 0,028 | 1,548      | 198                        | 545   | 618   | 70  | 0,042 | 1,06       |

Из табл. 3 получаем следующие усредненные значения:  $a = 0,095 \pm 0,5$ ;  $x \cong 21\%$ . Если учесть, что величина  $x$  зависит от ряда не поддающихся учету факторов (нестабильность порога

возбуждения  $\theta$  клетки, фоновая активность других нейронов ансамбля и т. д.), то полученные значения  $x$  можно считать вполне приемлемыми.

Таким образом, эксперимент подтверждает корректность те аналогов нейрона, у которых свойство адаптации моделируется инерционным звеном первого порядка. Следует отметить также адекватность полученного соотношения (2) аналитическим описаниям работы адаптационного механизма биологических систем [2, 3].

Рассмотрим теперь вопрос о том, какие параметры произвольного входного сигнала  $x(t)$  играют главную роль в возбуждении нервной клетки.

В экспериментах на нервно-мышечном аппарате *Rana temporaria* было показано [1], что такие параметры электрического раздражения, как амплитуда  $u$ , частота  $f$  и длительность  $\tau$ , влияющие на возбудимость объекта, не являются, однако, определяющими, поскольку удавалось получать оптимальные по интенсивности сокращения мышцы при неоптимальных значениях каждого из этих параметров. Анализ данных показал, что реакция мышцы определяется суммарной площадью раздражающих импульсов: одинаковые сокращения могут быть получены при различных  $u$ ,  $f$ ,  $\tau$ , важно лишь, чтоб при этом выполнялось условие

$$\sum_{i=1}^{fT} \int_0^{\tau} x(t) dt = \text{const} > \theta,$$

где  $T$  — время стимуляции.

Тем самым были дополнены известные сведения о том, что при стимуляции нервной ткани одиночным прямоугольным импульсом реакция возникает и неизменна, когда

$$\int_0^{\tau} x(t) dt \geq \theta,$$

$$\theta = \text{const},$$

т. е. определяется площадью стимула [4]. Полагая, согласно [4], что площадь сигнала — аналог энергии раздражения  $E$ , рассмотрим применимость энергетического подхода к анализу реакции нейрона.

Количество энергии  $E_i$ , которое нужно затратить для появления  $i$ -го спайка нейрона при подаче на его сумму сигнала вида (1), равно

$$E_i = I \Delta t_{i-1},$$

где  $\Delta t_{i-1} = t_i - t_{i-1}$ ;  $t_i$  — момент появления  $i$ -го спайка.

Отмечалось (например, [6]), что латентный период зависит от силы раздражения. Из приведенных в табл. 1, 2 данных видно, что диапазон амплитуд раздражающего тока, который составляет  $I = (2,8 \div 11,16) 10^{-9} \text{ A}$ , находится в соответствии с диапазоном

полученных латентных периодов:  $\Delta t_0 = \varphi(3,5 \div 12)$ , где  $\varphi$  — масштабный коэффициент (для осциллограмм — сек/мм).

Анализ ритмики нейрона с энергетических позиций показывает (см. результаты расчетов по формуле (7), приведенные в табл. 3), что при неизменных условиях эксперимента латентный период однозначно определяется энергией раздражения: площадь стимула от момента стимуляции до момента генерации нейроном первого спайка можно считать величиной постоянной ( $E_1 = \text{const}$ ). Максимальные отклонения от среднего значения  $\{\Delta E_{\text{max}}\}$ , согласно расчетам, составляют для первой серии экспериментов  $\Delta E_{1\text{max}} = 12\%$  ( $E_{1\text{ср}} = 154$ ), для второй серии  $\Delta E_{1\text{max}} = 13,4$  ( $E_{1\text{ср}} = 179$ ).

Такой результат может быть получен и дедуктивным путем на основании анализа выражений (5), (6). Но несомненный интерес представляет тот факт, что условие постоянства энергии стимуляции сохраняется также при генерировании клеткой последующих спайков. Это вытекает из сравнения значений  $E_2, E_3$ , которые вычислялись по формуле (7). Здесь максимальная погрешность составляет:  $\Delta E_{2\text{max}} = 36,2\%$ ;  $\Delta E_{2\text{max}} = 13,3\%$ ;  $\Delta E_{3\text{max}} = 19,4\%$ ;  $\Delta E_{3\text{max}} = 16,6\%$ . Неравенство  $E_i < E_{i+1}$  есть следствие работы адаптационного механизма нейрона.

Количественный анализ энергетических соотношений для последующих спайков ( $i > 3$ ) не производился из-за ограниченности статистического материала. Решение этой проблемы путем увеличения силы раздражения приводит к изменению функционального состояния клетки или к необратимым физиологическим изменениям. Вследствие наличия стохастических процессов в нервных элементах и сетях, влияние которых пропорционально продолжительности процесса генерации спайков, можно ожидать, что  $\{\Delta E_{i\text{max}}\}$  для последующих спайков будет увеличиваться.

Рассматривая зависимости (4) — (6) и результаты описанных исследований, приходим к выводу: при обработке сигналов биологические элементы и системы оперируют интегральными величинами раздражения.

**Устройство.** Результаты экспериментов явились основой для создания описанных ниже нейроподобных преобразователей. Свойство нейрона интегрировать произвольный входной сигнал  $x(t)$  указывает на необходимость использования в электронных аналогах управляемого интегратора, подобного применяемому в технике время-импульсного преобразования [7]. Таким образом, технической базой для нейроподобных устройств могут служить основные функциональные блоки стандартного время-импульсного преобразователя аналоговых сигналов.

На рис. 2 показана принципиальная схема аналого-дискретного преобразователя, в котором реализованы нейронные принципы кодирования и адаптации. Адаптивность моделируется в устройстве с помощью операционного усилителя У1, который совместно с R и C элементами представляет собой инерционное

звено 1-го порядка с заданным значением  $\alpha$ . Выходной сигнал реакции этого звена на входное возмущение  $x(t)$  — поступает один из входов дифференциального усилителя  $Y3$ , на второй вход которого подается исходный сигнал, проинвертированный  $Y2$ . Если  $k_3$  — коэффициент усиления усилителя  $Y3$ , равен  $k_1 > k_2 = 1$ , то в результате взаимодействия усилителей  $Y2$  и  $Y3$  реализуется выражение, аналогичное (2).

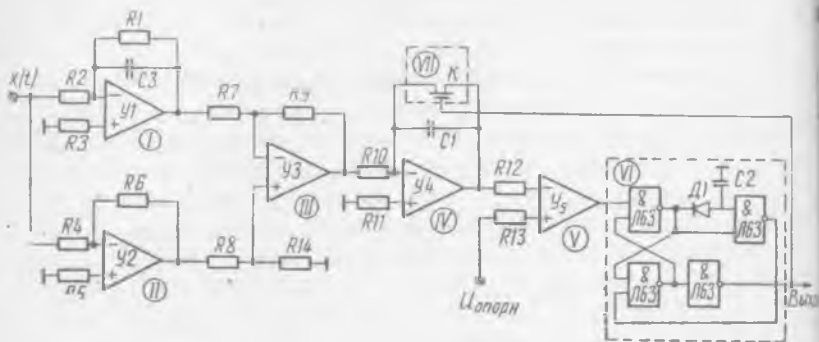


Рис. 2.

Свойство нейрона интегрировать раздражение моделируется с помощью операционного усилителя  $Y4$ , который совместно с включенными в цепь его обратной связи конденсатором  $C1$  представляет собой интегратор. Параллельно конденсатору  $C1$  подключен ключ  $K$ , который в исходном состоянии разомкнут, а при достижении на выходе интегратора напряжения  $u_{\text{инт}} = \int x(t) (1 - e^{-\alpha t}) dt$  некоторого значения, равного порогу возбуждения  $\theta = u_0$ , кратковременно замыкает цепь обратной связи и разряжает конденсатор  $C1$ .

Напряжение с выхода интегратора подается на один из входов компаратора  $Y5$ , на другой его вход подается опорное напряжение  $u_0$ . В момент  $t_i$  выполнения условия (4) компаратор генерирует сигнал, поступающий на схему формирования, которая обеспечивает преобразование этого сигнала в импульс стандартной формы, амплитуды и длительности, т. е. формирует спайк. Одновременно схема формирования управляет работой ключа  $K$ .

Амплитуда и длительность выходного импульса, имитирующего спайк, зависит от электрических параметров схемы формирования, которая в данном случае представляет собой одновибратор, собранный на диоде  $D1$  и интегральной микросхеме (ИС) серии 157. Управляемый ключ  $K$  выполнен на ИС типа 1КТ431;  $Y1$  —  $Y5$  выполнены на базе операционных усилителей (ИС типа 1УТ531А).

В результате описанное устройство обеспечивает адаптивное преобразование  $x(t)$  во время-импульсный код, причем кодируемым параметром здесь служит интеграл раздражения. Таким

кодирование обеспечивает не только сокращение избыточности данных за счет адаптивности, но и обладает существенным достоинством — помехоустойчивостью. Во-первых, помехоустойчив код, получаемый в результате кодирования, во-вторых, вид преобразования способствует подавлению аддитивной высокочастотной помехи.

Критерий выбора величины порога  $u_0 = \theta$  нетрудно получить на основании (4) и известного соотношения [8]:

$$\Delta t = \frac{1}{2f_{\max}}, \quad (8)$$

где  $f_{\max}$  — максимальная частота спектра случайного сигнала  $x(t)$ .

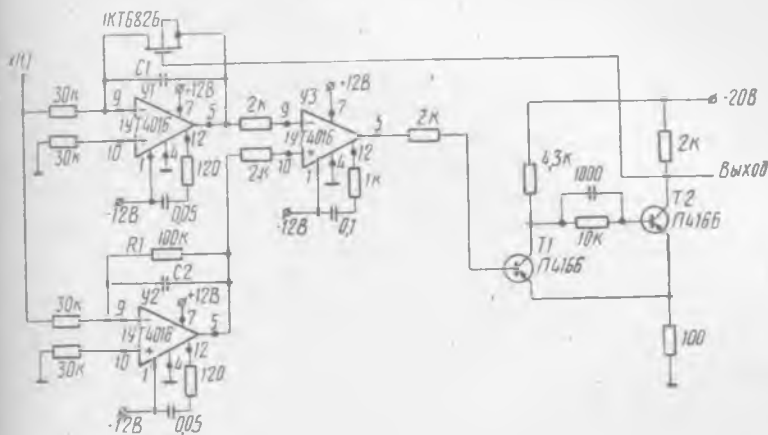


Рис. 3.

Путем несложных преобразований из (4) и (5) получим  $u_0 = \frac{X(t)_{\max}}{2f_{\max}}$ . Здесь  $X(t)_{\max}$  — максимально допустимая амплитуда преобразуемого случайного сигнала.

Описанный преобразователь имеет сходство с известными моделями нервной клетки (искусственный адаптивный нейрон [1]). Отличие заключается, прежде всего, в четко выраженном принципе кодирования сигнала по энергии. Другой вариант технической реализации данных исследований, приведенных выше, — преобразователь с самоорганизацией порога возбуждения. Его принципиальная схема показана на рис. 3.

Усилители  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  по принципу действия и назначению аналогичны соответственно  $Y_4$ ,  $Y_1$ ,  $Y_5$  устройства, описанного выше. Отличаются лишь электрические параметры элементов: в описываемом преобразователе операционные усилители выполнены на ИС типа К1УТ401Б. Выходной блок — триггер Шмитта, образованный на транзисторах  $T_1$ ,  $T_2$  (см. рис. 3), предназначен

для формирования выходных импульсов стандартной формы управления ключом  $K$ . Ключ  $K$  по назначению и исполнению одинаков с блоком VII предыдущего устройства.

При сравнении устройств, представленных на рис. 2 и 3, трудно видеть, что реакция на входной сигнал вида (1) у них одинакова; этим сходство их работы ограничивается. Отличительным свойством описываемого нейроразличительного устройства является изменение порога в зависимости от  $x(t)$ . Это обеспечивается подачей вместо постоянного опорного напряжения  $u_0$  компаратор  $Y3$  через инерционное звено  $Y2$  входного сигнала.

В результате на опорный (второй) вход компаратора с задержкой во времени, величина которой зависит от параметров  $R1$  и  $C2$ , поступает сигнал  $u_0(t)$ , сравниваемый с напряжением  $x(t)$ , образующимся на выходе  $Y1$ .

Преобразователь с самоорганизующимся порогом возбуждения обладает, подобно нервному элементу, свойством трансформации входного раздражения. В табл. 4 приведены некоторые данные испытаний устройства, показанного на рис. 3, при подаче на его вход сигнала синусоидальной формы (положительной полярности). Как видно из табл. 4, коэффициент «трансформации ритма» зависит от параметров (амплитуда, частота) входного сигнала, но определяется, прежде всего, соотношением инерционностей интегратора ( $Y1$ ) и звена первого порядка ( $Y2$ ). Как видно из рис. 3, инерционность  $Y1$  зависит от величины  $R1$ , а инерционность  $Y2$  — от  $R1$  и  $C2$ .

Таблица 4

| $C1$ , мкф | $C2$ , мкф | $f$ , Гц | $U_{вх}$ , В          | Деление частоты |
|------------|------------|----------|-----------------------|-----------------|
| 0,5        | 0,6        | 150      | $\leq 0,5$<br>$> 0,5$ | 1:2<br>1:2      |
| 0,5        | 0,5        | 20—20000 | 0,1—3,0               | 1:1             |
| 0,5        | 0,1        | 200      | 0,1—0,19              | 1:6             |
|            |            |          | 0,2—0,69              | 1:5             |
|            |            |          | 0,7—0,89              | 4:4             |
|            |            |          | 0,9—1,24              | 1:3             |
|            |            |          | $> 1,25$              | 1:2             |
| 0,5        | 0          | 20—1350  | 0,1—3,0               | 1:1             |
|            |            | 1400     | $\geq 1,0$            | 1:2             |
|            |            | 1400     | $< 1:0$               | 1:1             |

Особый интерес представляет случай, когда  $C1 \approx C2$ . В этом преобразователь работает подобно отметчику экстремумов, выходные импульсы отмечают (с временным сдвигом) максимумы и минимумы входного сигнала.

мы входного сигнала (указанной синусоиды). Особенностью такого отметчика является высокая стабильность работы — коэффициент деления частоты входного сигнала постоянен (равен 1) при изменении в широких пределах как его частоты, так и амплитуды (см. п. 2 табл. 4).

При указанных в п. 3 табл. 4 значениях  $C1$  и  $C2$  устройство может работать, например, как многозначный элемент — делитель частоты с переменным коэффициентом деления (деление обеспечивается в целое число раз).

В заключение отметим, что описанные преобразователи могут найти широкое применение в технике обработки информации, в частности при создании многофункциональных искусственных нейронных сетей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логинов В. М., Цепков Г. В., Чинаев П. И. Экономическое кодирование. Киев, «Техніка», 1976, с. 94—103, 147—150.
2. Лазарев П. П. Результаты и перспективы 30-летних работ по ионной теории возбуждения и адаптации периферического зрения.— «Биофизика», 1940, т. 33, с. 33—68.
3. Гилл А. Два фактора времени в электрическом раздражении нерва.— «Физиол. журн. СССР», 1935, т. 19, вып. 1, с. 115—129.
4. Катц Б. Нерв, мышца и синапс. М., «Мир», 1968, с. 29—32.
5. Антомонов Ю. Г. К энергетической теории возбуждения нервной ткани.— В кн.: Вопросы нейрофизиологии. М., «Медицина», 1966, с. 49—54.
6. Ахмеров У. Ш. Основные этапы в изучении зависимости между пороговой силой и длительностью электрического раздражения.— В кн.: Исследования по бионике. Изд-во Казанск. ун-та, 1969, вып. 1, с. 5—18.
7. Махьянов В. Д., Милохин Н. Т. Устройства частотного и временно-импульсного анализа. М., «Энергия», 1970, с. 34—36.
8. Харкевич А. А. О теореме Котельникова.— «Радиотехника», 1958, т. 13, № 8, с. 3—10.

*Поступила 3 февраля 1977 г.*

УДК 612.82.014.42.001.57

*Г. А. КОЛОТЕНКО, Г. И. ЕВТУШЕНКО, д-р мед. наук,  
С. Ю. ДИДЕНКО, канд. техн. наук*

#### **ТЕНЗОРНАЯ МОДЕЛЬ МНОЖЕСТВА ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СВЯЗЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА**

В связи с внедрением агрегатных систем вычислительной техники в практику клинических и экспериментальных исследований актуальной задачей становится согласование психофизиологических показателей человека-оператора с параметрами ЭВМ и специализированными медико-биологическими электроприборами. Поэтому возникает необходимость разработки тензорных моделей пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, позволяющих дифференцировать вероятные показатели психофизиологических изменений, обмерить

их методами биологической и медицинской кибернетики. В общем плане, по словам Н. А. Бернштейна, «углубленное ознакомление с физиологией очень обогащает ... изобретательную мысль [1] инженеров.

Цель статьи — построение тензорной модели иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей и головного мозга на основе соотношений импульсной и электротонического возбуждений целостного мозга.

Важность разрабатываемой темы аргументируется словами П. К. Анохина: «Если оценить по глубокой физиологической сущности все те примеры, которые И. П. Павлов разбирает связи с вопросами о соотношении возбуждения и торможения то не остается никакого сомнения в том, что он много раз подходил вплотную к проблеме взаимодействия двух взаимно включающих целостных деятельностей организма» [2]. Взаимное исключение «двух деятельностей», существующих в единстве противоречий, подтверждает правильность тензорной модели множества иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей, как своеобразного «энергетического диполя». Устойчивость неравновесия зон депрессии и экзальтации, формирующих архитектуру доминантных систем анализируемых связей, в данном случае «относится только к условиям их возникновения, но не к самим процессам в основе» [3].

«Конфликтность» зон депрессии («молчания»), регенерации и зон экзальтации, генерации импульсного возбуждения, обратного в форме иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, приводит к неизбежному поддержанию «оптимального хода» процессов целостного мозга операторов АСУ. При опухолях головного мозга и травматических нарушениях сдвиг систем пространственно-временных связей в положительную или отрицательную сторону, т. е. доминирование прямых или обратных связей головного мозга, приводит к обратимому или необратимому перетрофированию устойчивой неравновесности систем импульсного и электротонического возбуждений, а вместе с ними к новому, последующему изменению архитектуры интегративных структур вероятных и маловероятных систем и подсистем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, как неделимой единицы.

Преобразования множества иерархических систем пространственно-временных связей головного мозга, отображающих расщепление импульсного возбуждения целостного мозга во времени и пространстве, эффективно идентифицируется при помощи элементов тензорного исчисления.

Пусть система пространственно-временных связей головного мозга, характеризующаяся свойствами тензора, определена относительно координатной системы посредством некоторых чисел про-

пространственно-временных вероятных связей, которые могут быть условно названы тензорными подсистемами пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга. Когда эти подсистемы переключаются для другой системы координат с учетом правил преобразования матричного анализа, связывающего обе системы координат. Так как иерархические системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга нелинейны и неоднородны, то они не общекординатны.

Системы пространственно-временных связей головного мозга, также любые звенья иерархических подсистем пространственно-временных связей головного мозга, входящие в эти системы связаны как тензор или как компоненты тензора, обладают ковариантностью  $A_V$  или контрвариантностью  $A^V$ , кибернетически идентифицируя меру отклонения от исходного состояния. В диалектике единства противоречий иерархические системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга одновременно отображают оба эти свойства  $A^V_V$ . Каждое из этих свойств в определенных условиях и ситуационных обстоятельствах проявляется в системах пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга в большей или меньшей степени, доминантно, суперпозиционно складываясь, считаясь и т. д. К примеру, 16 произвольно отобранных контрвариантных подсистем  $A^{Vm}$  пространственно-временных связей головного мозга можно представить в виде суммы четырех слагаемых типа  $A^V B^m$ , составленных из компонент четырех пар надлежащим образом выбранных четырехмерных векторов. Подобные преобразования можно производить с ковариантными подсистемами пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга при различных функциональных состояниях.

Тензорные системы и подсистемы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга симметричны, если две подсистемы, получающиеся друг от друга перестановкой каких-либо двух знаков, что может свидетельствовать об изменении весовой направленности, структурно равны между собой, возможно, вызывают одинаковый эффект:  $A^{mV} = A^{Vm}$ ,  $A_{mV} = A_{Vm}$ .

Тензорные системы и подсистемы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга асимметричны, если перестановка полярностей двух подсистем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга идентичных структур приводит к противоположной направленности по знаку. Следовательно, тензорная система пространственно-временных связей головного мозга  $A^{mV}$  (или  $A_{mV}$ ) антисимметрична, если  $A^{mV} = -A^{Vm}$  (или  $A_{mV} = -A_{Vm}$ ).

Такой подход кибернетического анализа множеств иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга позволяет раскрыть дополни-

тельные возможности динамики развития в единстве противоречий электротонического и импульсного возбуждений целостного мозга, с одной стороны, выявив ранее не замеченные функции формализация которых дает возможность проектировать биомеханические устройства, включаемые в системы автоматического управления, с другой — выработать методический инструментарий для расширения технических средств медицинского электроприборостроения с диагностическими целями.

Кроме того, подсистемы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга одной тензорной системы  $A$  аналогичных связей в процессе тензорного моделирования могут попарно перемножаться со всеми подсистемами второй тензорной системы  $B$  пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга. Так, из различного типа тензорных систем  $A$  и  $B$  получается тензорная система  $T$  пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга:

$$T_{mvl} = A_{mv}B_l; \quad T^{mvlk} = A^{mv}B^{lk}; \quad T_{lk}^{mV} = A_{lk}B^{mV}.$$

Путем внутреннего, внешнего и смешанного умножений тензорной системы пространственно-временных связей головного мозга на «фундаментальную» тензорную систему пространственно-временных связей возникают системы связей другого характера и ранга, в результате чего могут характеризоваться образование пространственно-временных синхронных и асинхронных связей целостного организма.

Из смешанной тензорной системы пространственно-временных связей головного мозга  $A_V^m$  можно сформировать тензорную систему пространственно-временных связей мозга, ранг которой на единицы меньше. Для этого один «ковариантный» знак приравливается одному «контрвариантному» знаку, после чего производится «свертывание» (суммирование) тензорной системы пространственно-временных связей головного мозга. Например, из смешанной тензорной системы пространственно-временных связей головного мозга четвертого ранга в результате эквивалентных преобразований образуется смешанная тензорная система пространственно-временных связей головного мозга второго ранга  $A_V^m$ :  $A_V^m = A_{kV}^{km} (= \sum_k A_{kV}^{km})$ , где  $l=k$ .

Исходя из того, что архитектура множества иерархических тензорных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга зависит от взаимодействия существующих в единстве противоречий импульсного электротонического возбуждений целостного мозга, можно предположить: в зависимости от изменения ранга тензорной системы пространственно-временных связей головного мозга происходит «свертывание» или «развертывание» в пространстве целостного мозга системы импульсного возбуждения. Так как из тензорной системы пространственно-временных связей головного мозга

можно получить тензорную систему пространственно-временных связей головного мозга нулевого ранга  $A = A_m^m = A_{mV}^{mV}$ , то тензорная система пространственно-временных синхронных связей головного мозга может переходить в тензорную систему асинхронных связей или вырождаться в нуль. В результате система импульсного возбуждения в данной зоне головного мозга преобразуется в электротоническое возбуждение или другую биоэнергетическую форму.

Внутреннее и смешанное умножение тензорной системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга заключается в комбинации внешнего умножения со сверткой. Например, из ковариантной тензорной системы пространственно-временных синхронных связей головного мозга второго ранга  $A_{mV}$  и контрвариантной тензорной системы пространственно-временных асинхронных связей головного мозга первого ранга  $B^n$  образуется посредством внешнего умножения смешанная тензорная система пространственно-временных связей головного мозга:  $T_m^n = A_{mV} B^n$ .

В результате свертки по индексам  $V, k, n$  возникает ковариантная четырехмерная векторная система пространственно-временной связи головного мозга:  $T_m = T_{mV}^V = A_{mV} B^n$ .

Тензорная система  $T_m$  пространственно-временных связей головного мозга производит внутреннее произведение тензорных систем  $A_{mV}$  и  $B^n$  пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга.

Из тензорных систем  $A_{mV}$  и  $B^{lk}$  посредством внешнего умножения и двукратной свертки можно образовать внутреннее произведение систем  $A_{mV} B^{lk}$  пространственно-временных синхронных связей головного мозга.

Реализуя внешнее произведение систем  $A_{mV}$  и  $B^{lk}$  и выполняя свертку, получим смешанную тензорную систему пространственно-временных связей головного мозга второго ранга:  $T_m^l = A_{mV} B^{Vlk}$ . Эту операцию, как известно, называют смешанной, так как она является внешней по отношению к знакам  $m$  и  $k$  и внутренней по отношению к  $m$  и  $l$ . Тензорные системы пространственно-временных связей головного мозга, подвергнутые смешанным операциям в процессе преобразования, называются смешанными.

Тензорная система пространственно-временных связей головного мозга  $A_{mV} B^{mV}$  находится в состоянии относительной устойчивости, если в результате эквивалентных преобразований образуется из тензорных систем  $A_{mV}$  и  $B^{lk}$  пространственно-временных синхронных связей головного мозга. Отсюда, если  $A_{mV} B^{mV}$  для тензорной системы  $B^{mV}$  пространственно-временных синхронных связей головного мозга представляет инвариант (скаляр), то система  $A_{mV}$  имеет тензорный характер.

Если системы  $B^m$  и  $C^V$  пространственно-временных связей головного мозга имеют векторный характер и если при любом

их выборе внутреннее произведение  $A_{m\nu}B^mC^\nu$  является скалярно-тензорной системой  $A_{m\nu}$  пространственно-временных связей головного мозга характеризуется ковариационным тензором. Поэтому тензорный характер импульсного возбуждения целостного мозга может на определенных стадиях развития сведен к относительно скалярному характеру. При таком системно-кибернетическом процессе «дипольная устойчивость» систем импульсного и электротонического возбуждений не противоречива.

Усиление скрытого доминантного состояния электротонического возбуждения, вызывающего в определенных зонах торможение центров экзальтации импульсного возбуждения целостного головного мозга, видоизменяет архитектуру доминантных систем. С одной стороны, относительная скалярная устойчивость последнего в пространстве и времени обуславливает архитектуру доминантных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга и разрешение единства противоречий предшествующего доминантного состояния. С другой стороны, переходя в сферу электротонического возбуждения, не «склонному» к перерастанию в экзальтирующий центр импульсного возбуждения, который при облегченных условиях может возникнуть в окрестности мозга на основе флюктуирующих «предвозбужденных» состояний, приводит к «затуханию», депрессии.

Очевидная доминанта иерархических систем пространственно-временных связей головного мозга, возникшая на базе явной, флюктуирующей выраженности системы импульсного возбуждения, определяет характер, в частности, тензорных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга операторов АСУ при различных функциональных состояниях. Системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга присущи всему организму головного мозга, только с доминантностью в определенных зонах и отделах. В этом специфическая неоднородность распределения импульсного и электротонического возбуждений, нелинейность самого импульсного возбуждения, трансформирующей топологию архитектуры доминантных систем и подсистем пространственно-временных синхронных и асинхронных отношений целостного мозга.

Таким образом, тензорная модель множества систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга позволяет выделить вероятную полезную информацию о преобразовании биоэлектрической активности головного мозга и применить при технико-бионической реализации как к задачам регулирования процессами в условиях производства так и при самокоррегировании.

Как видно, зоны генерации и регенерации биоэлектрической активности формируют множество тензорных систем и подсистем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей

головного мозга, противостоящих друг другу. Наиболее вероятным механизмом «вытормаживания» одного множества тензорных систем пространственно-временных синхронных связей головного мозга другим множеством систем аналогичных связей интегративно сцепленных структур является, по словам П. К. Анохина, «комбинация импульсного электротонического действия» [2, с. 168], характер которого обусловлен несомненным разнообразием ситуационных условий.

Ткань головного мозга «пронизана» множеством разночастотных тензорных систем и подсистем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, дифференцируемых в зависимости от функциональных состояний по вероятностной направленности проявлений, неопределенных — для резонирующих частот. Каждая тензорная система пространственно-временной связи головного мозга «занимает во времени пространстве именно то место, которое придает данной реакции максимально полезное приспособительное значение» [2, с. 179]. Не исключено, что тензорные системы пространственно-временных связей головного мозга, как функции быстродействующей составляющей, выполняют существенную роль в процессах «опережения».

Топологическое распределение «встречи» тормозящего и тормозимого возбуждения электротонической (постоянной) и импульсной (переменной) составляющих возбуждения головного мозга представляет сложную архитектурную картину интегративно связанных структур, отображающих, как отмечалось, иерархическую тензорную систему разнообразных нелинейно связанных частот, расположенных в пространстве и времени относительно автономно и вместе с тем интегративно, неразрывно, синтезировано.

В процессе пространственно-временной организации синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга обнаруживается изменчивость, пластичность, гибкость функциональных связей, проявляющаяся в одновременном и разномоментном участии одной и той же зоны и совокупности зон в деятельности относительно независимых систем, формируя при этом относительно вероятную устойчивость проявления определенных пространственно-временных структур и подструктур и, возможно, кибернетически идентифицируя при помощи тензорного моделирования конкретные механизмы самоорганизации биоэлектрических явлений целостного головного мозга.

Информационно-статистический анализ взаимодействия систем импульсного и электротонического возбуждений, проявляющихся в форме множества иерархических тензорных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, углубляет представление о преобразовании биоэлектрических процессов в пространстве и времени и может быть использован в теории роботов при разработке электронных бионических схем.

Интерпретация аддитивного поведения множества тензорных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга может, как указывалось, с одной стороны использоваться в качестве регулирования гомеостаза системы организма, с другой — явиться принципом, заложенным в основу функционирования адаптивных устройств и комплексов. Математический подход тензорного гомоморфного моделирования множества иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей целостного мозга является надежным диагностическим признаком состояния человека.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн Н. А. Очерки по физиологии движения и физиологии активности. М., «Медицина», 1966. 254 с.
2. Анохин П. К. Внутреннее торможение как проблема физиологии. Медгиз, 1958, с. 108, 168, 179.
3. Павлов И. П. Полное собрание трудов. Т. 3, М.—Л., 1949. 336 с.

Поступила 26 апреля 1977

УДК 62—501.72

С. А. ФИЛОНИК

#### О ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ НА БАЗЕ СЕМИОТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ. ЧАСТЬ 2. ТЕОРЕМЫ. ОБЩАЯ БЛОК-СХЕМА СИСТЕМЫ

В первой части настоящей работы была сформулирована проблема, описаны модельные допущения, выделяющие класс изучаемых больших систем, и рассмотрен аппарат теории фреймов, необходимый для представления глубинного смысла текстов, описывающих ход развития событий. Цель настоящей части работы — рассмотрение некоторых возможностей языка, на котором будет строиться описание системы прогнозирования, а также краткое описание общей блок-схемы системы.

**1. Теоремы.** В качестве языка описания системы прогнозирования удобно взять *PLANNER*, получающий все большую популярность как средство программирования многих задач искусственного интеллекта. Для мега-описания работы системы прогнозирования достаточно ограничиться описанием языка *PLANNER*, приведенным в [1], а также в [3]. Для конкретного программирования необходимо обращаться к действующей системе программирования для языка *PLANNER* (например, разработанной в ВЦ МГУ [2] и реализованной в системе разделения времени «Пульт — БЭСМ» в ВЦ АН СССР) либо, если таковой нет, интерпретировать операторы языка *PLANNER* в виде подпрограммы на языке ЛИСП.

Чтобы получить представления об интересных возможностях языка *PLANNER*, опишем некоторые его основные операторы. При этом мы пользуемся обозначениями данных операторов, взятыми в [1], что вовсе не означает, что они будут такими же в некоторой конкретной версии языка.

1. (*THGOAL* предикат; аргумент, аргумент, ..., аргумент). Этот оператор имеет в качестве единственного аргумента список  $\alpha$ . Список состоит из предиката и его аргументов. Число аргументов предиката в списке  $\alpha$  соответствует числу семантических актов этого предиката. Выполнение оператора *THGOAL* заключается в следующем. Список  $\alpha$  рассматривается как поисковое предписание (запрос), для которого должно быть найдено соответствие путем поиска в массиве данных. Если список  $\alpha$  в массиве данных найден, то выполнение оператора заканчивается, а найденный в массиве данных список  $\alpha$  выдается в качестве результата работы (выполнения) этого оператора.

Если непосредственный поиск в массиве данных ничего не дал, то тогда информацию, передаваемую этим списком  $\alpha$ , необходимо «обосновать» или «доказать», или убедиться в ее несостоятельности. Это происходит посредством вызова соответствующих консеквентных теорем (типа цели, причины или дедукции) и построения доказательства этих теорем. Последнее означает поиск оснований (подцелей, причин или посылок), обосновывающих справедливость утверждения, выраженного этим списком  $\alpha$ -аргументом оператора *THGOAL*.

Необходимые для построения обоснования утверждения (выражаемого списком  $\alpha$ ) консеквентные теоремы либо явно указываются в исходной программе сразу вслед за оператором *THGOAL* (они описываются как необходимые для доказательства (построение основания) посредством оператора *THGOAL*), либо они не указываются явно, а программе-интерпретатору языка *PLANNER* предлагается искать в массиве консеквентных теорем все те теоремы, которые могут помочь доказать данную теорему *THGOAL* (это указывается оператором-списком (*THTRUE*)). В первом случае, когда необходимые теоремы явно указаны в тексте программы, консеквенты этих консеквентных теорем зачастую не совпадают со списком  $\alpha$ , тем самым здесь уже на первом шаге доказательства имплицитно утверждается, что вводимые оператором *THUSE* теоремы в действительности (после построения их доказательств) не обосновывают утверждение  $\alpha$  непосредственно, а обосновывают только свои собственные консеквенты. Но поскольку оператор *THUSE* предлагает эти консеквентные теоремы для обоснования утверждения  $\alpha$ , то это означает, что данные теоремы действительно  $\alpha$  обосновывают. Переход «консеквент вспомогательной теоремы» — «утверждение  $\alpha$ », постулируется оператором *THUSE* как правомерный для обоснования утверждения  $\alpha$  через обращение к вспомогательным теоремам. Во втором случае, когда оператор *THTRUE*

иницирует поиск теорем, необходимых для обоснования исходной теоремы *THGOAL* в массиве консеквентных теорем, из массива консеквентных теорем выбираются те теоремы, которые допускают сопоставление с исходной целью, т. е. либо их консеквент тождественен списку  $\alpha$ , либо он ему соответствует в некотором смысле (например, в смысле совпадения предикатов и аргументов), либо их консеквент непосредственно обосновывает утверждение  $\alpha$ .

2. (*THUSE* теорема, ..., теорема). Этот оператор обычно следует сразу же вслед за оператором *THGOAL*. Оператор *THUSE* имеет в качестве своих аргументов названия (имена) теорем. Вполнение оператора *THUSE* есть вызов консеквентных теорем, имена которых содержатся в списке аргументов оператора *THUSE*. Эти теоремы вызываются для того, чтобы использовать их в построении утверждения  $\alpha$ , выраженного списком-аргументов оператора *TNGOAL*, непосредственно предшествующего данному оператору *THUSE*. После выполнения оператора *THUSE* система *PLANNER* ищет доказательства теорем, вызванных этим оператором. Поиск доказательства теорем протекает абсолютно идентично уже описанной процедуре построения доказательства теорем. Предполагается, что человек, писавший программу, действительно убежден в том, что доказательство этих вспомогательных теорем, вызываемых оператором *THUSE*, приводит к обоснованию справедливости (истинности) утверждения  $\alpha$ . Это внелингвистический элемент, видимо, никак нельзя элиминировать, т. е. невозможно (или крайне громоздко) формально выразить соответствие между консеквентом и его обоснованием. Ответить на вопрос, почему данное обоснование действительно обосновывает данный консеквент). Поэтому внутри системы *PLANNER* это соответствие постулируется как имеющее место и не нуждается в более детальных рассмотрениях.

Здесь под обоснованием консеквента мы понимаем следующие:

1) *Его подцели* в случае КЦ-теорем (консеквентных типа цели), у которых консеквент — это глобальная цель, а его обоснование (результат доказательства теоремы) — развертка данной цели подцели, план, реализующий эту цель.

2) *Его причины* в случае КП-теорем (консеквентных типа причины), у которых консеквент — это следствие, а его обоснование (результат доказательства теоремы) — причина, которая вызывает данное следствие.

3) *Его основания-посылки* в случае КД-теорем (консеквентных типа дедукции), у которых консеквент — это некоторое утверждение, не являющееся ни целью, ни причиной или следствием, а его (утверждения) обоснование (результат доказательства теоремы) — те посылки, из которых данное утверждение логически вытекает.

3. (*DEF THEOREM* имя...) — невыполняемый оператор, который некоторым именем всю следующую ниже (до закрытия

всех скобок) программу и указывающий (для внешних вызовов), что эта программа представляет собой определение некоторой теоремы. Определение теоремы помимо 1) входного невыполняемого оператора *DEFTHEOREM* и 2) имени содержит также 3) указание на ее тип (консеквентная или антецедентная); 4) список переменных, фигурирующих в определении теоремы; 5) утверждение, которое необходимо «доказать», обосновать его справедливость (найти антецедент данного консеквента, т. е. найти его подцели, причины или основания — посылки — в случае консеквентных теорем). В случае антецедентных теорем их доказательство означает поиск консеквента для данного антецедента, т. е. поиск соответственно 1) глобальных целей, реализуемых данной иерархией подцелей, 2) физических следствий, детерминированных данными причинами, или 3) логических следствий, вытекающих из данных посылок.

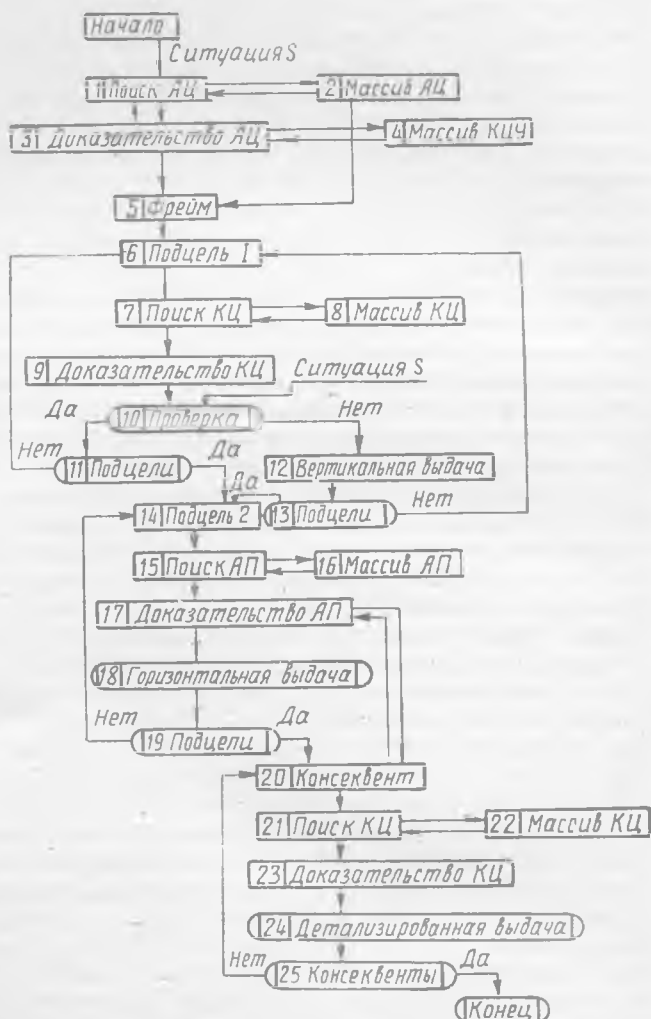
Кроме этого, определение теоремы содержит в явном виде описание всех шагов ее доказательства, успешное выполнение которых (т. е. выполнение соответствующих каждому шагу операторов), приводит к обоснованию справедливости (доказательству того утверждения, которое составляет предмет обсуждения для данной теоремы (консеквент — в случае антецедентных теорем). На первый взгляд такое определение теоремы, в котором явно указаны все возможные шаги ее доказательства, делает тривиальной постановку вопроса о каком-либо «поиске» доказательства теоремы, однако это не так. Дело в том, что в определении теоремы представлен только наиболее высокий (в смысле наиболее обобщенный) уровень представления ее доказательства. На этом уровне отсутствует какой-либо поиск в массиве данных, а все основания центрального утверждения теоремы (перечисленные в той схеме ее доказательства, которая задается явно в ее определении) представляют собой теоремы, построение доказательства которых уже может привлекать и поиск в массиве данных (а также может вызывать и другие теоремы, обосновывающие данную подтеорему).

Таким образом, при построении доказательства теоремы имеет место рекурсивный последовательный вызов других теорем и спуск на все более детальные (менее обобщенные) уровни представления оснований, вплоть до прямого поиска соответствующих оснований в массиве данных.

**II. Общая блок-схема системы прогнозирования.** На рисунке приведена общая блок-схема системы прогнозирования. На этом уровне описания работа системы выглядит следующим образом.

1. Описание текущей ситуации, сложившейся к некоторому моменту времени в виде текста на семантическом языке, поступает в блок *I*. Эта ситуация *S* описывает ход событий, подлежащий прогнозированию. Перевод описания с естественного языка семантически (построение СемПтекста) здесь не рассматривается и не предполагается, что этот перевод уже осуществлен

(вручную или автоматически). Блок 1 осуществляет поиск той АЦ-теоремы (антецедентной типа цели), антецедент которой совпадает с ситуацией  $S$ . При этом блок 1 обращается к блоку 2, в котором хранятся АЦ-теоремы (фреймы). Предполагается, что ситуация описывается на микроуровне действия неко-



торых индивидов за определенный промежуток времени. Требуется выяснить, на обеспечение реализации каких целей действия направлены. Иерархия целей в тексте никак не передается, а выражена в фреймах, организованных в массиве АЦ-теорем. Ситуация  $S$  рассматривается как антецедент — пла-

для которого требуется найти консеквент — глобальные цели, достигаемые в результате реализации данного плана. Это происходит на втором шаге работы описываемого алгоритма.

2. Выбранная на шаге 1 АЦ-теорема (фрейм, с условиями входа в него) поступает в блок 3. Этот блок строит доказательство указанной АЦ-теоремы, которое заключается в проверке выполнения условий входа во фрейм на СемП ситуации  $S$ . В процессе этого привлекаются КЦУ-теоремы (консеквентные типа цели-условия входа) из соответствующего массива. КЦУ-теоремы отличаются от обычных КЦ-теорем тем, что при построении их доказательства поиск нужных выражений осуществляется не в массиве данных, а непосредственно в СемП ситуации  $S$  (исходного текста). Если доказательство выбранной на шаге 1 КЦ-теоремы в блок 3 успешно построено, то это означает, что на СемП текста выполнены условия входа во фрейм. Если произошла неудача, значит, блок 1 ищет другую подходящую теорему. Если достигнут успех, то СемП текста вместе с выбранным после доказательства соответствующей АЦ-теоремы фреймом поступает в блок 5, где происходит наложение фрейма на СемП текста (ситуацию  $S$ ). Тем самым окончательно строится для данного antecedента плана действия, описанного в исходном тексте, обосновывающий его консеквент — иерархия целей, достигаемых в результате реализации данного плана.

Кроме иерархии целей, фреймы, как указывалось в [4], передают на разных уровнях обобщенности еще и каузативные связи между событиями, а также между ситуациями и задачами индивидов, вытекающими из факта реализации событий этих ситуаций. Такого рода фреймы также хранятся в массиве АЦ-теорем и накладываются на СемП текста после проверки условий входа во фрейм в результате построения доказательства соответствующей АЦ-теоремы. Эти фреймы используются блоком 17 при построении горизонтального прогноза, что в терминах языка *PLANNER* интерпретируется как построение доказательства соответствующей АП-теоремы (antecedentной типа причины).

3. С выхода блока 5 на вход блока 6 поступает СемП исходного текста с наложенными на него фреймами. В блоке 6 осуществляется (в некотором фрейме) выбор очередной подцели (в смысле очередности снизу вверх) из иерархии подцелей, образующих фрейм. При первом вхождении в блок 6 выбирается подцель из уровня иерархии, ближайшего к уровню обобщенности, на котором описан план действий индивидов в исходной ситуации  $S$ . При повторных входах в этот блок выбирается подцель из уровня, непосредственно следующего за уровнем обобщенности описания целей, который анализировался после предшествующего вхождения в этот блок.

4. Далее в блоке 7 осуществляется поиск КЦ-теорем, консеквент которой совпадает с выбранной на предыдущем шаге

подцелью (или в некотором смысле ей соответствует). При этом блок 7 запрашивает блок 8. После этого в блоке 9 строится доказательство только что выбранной КЦ-теоремы, что означает построение развертки соответствующей цели. Напомним здесь, что доказательство КЦ-теорем (консеквентных типа цели) заключается в построении по данному консеквенту (некоторой цели) — обосновывающего этот консеквент antecedента — развертки цели на подцели, плана (в виде иерархии подцелей), реализация которого обеспечивает достижение соответствующей цели. Построенная в блоке 9 развертка подцели, выбранной в блоке 6, поступает далее в блок 10.

5. Одновременно в блок 10 подается исходная ситуация (план действий индивидов на определенном промежутке времени). В этом блоке проверяется, совпадает ли развертка подцели с этим планом. Если да, то это означает, что выбранная в блоке 6 подцель реализуется в исходной позиции 9 соответствующим планом действий до конца. В этом случае в блоке 11 проверяется, исчерпана ли иерархия подцелей, образующих данный фрейм. Если нет, то управление передается в блок 9, где выбирается следующая подцель из иерархии. Если же в блоке 11 окажется, что развертка выбранной подцели не совпадает с планом, отраженным в исходной ситуации  $S$ , значит, эта подцель данным планом реализуется не до конца (для некоторых (или каждого) из индивидов). В этом случае развертка подцели включает в себя, помимо плана действий из исходной ситуации, еще и дополнительные действия (дополнительный план), выполнение которых обеспечивает реализацию этой подцели до конца. Поскольку предполагается, что на данном временном интервале цели индивидов меняться не будут, это заставляет предположить, что и в будущем действия индивидов будут направлены на обеспечение реализации тех же целей. В этом случае срабатывает блок 12, который выдает развертку подцели, построенную в блоке 8, в качестве прогноза хода развития событий, описанных в исходной ситуации  $S$ . Этот прогноз называется вертикальным (целевым), поскольку он представляет собой развертку не до конца достигнутых целей.

Далее в блоке 13 проверяется, исчерпана ли иерархия подцелей, образующая данный фрейм. Если не исчерпана, то управление передается снова в блок 6, где выбирается основная подцель из иерархии. Затем цикл построения вертикальных прогнозов повторяется до тех пор, пока не будет исчерпана иерархия подцелей, образующая данный фрейм.

6. Когда это произойдет, начинает работать блок 14. Он аналогичен блоку 6. В этот блок можно попасть из блоков 11 и 13, если окажется, что исчерпана уже вся иерархия для некоторого фрейма. В блоке 14 повторно происходит выбор очередной подцели из иерархии целей, образующих данный фрейм. При первом входе в этот блок выбирается подцель из уровня обобщен-

ности, ближайшего к уровню описания плана действий индивидов в исходной ситуации *S*. При повторных входах в блок 14 выбирается каждый раз подцель из уровня обобщенности, непосредственно следующего за уровнем, который анализируется на очередном шаге цикла.

7. Далее (когда подцель выбрана) начинает работать блок 15, который осуществляет поиск в массиве АП-теорем (блок 16) такой АП-теоремы (антецедентной типа причин), у которой антецедент совпадает с выбранной на предыдущем шаге подцелью (или в некотором смысле ей соответствует). После выбора в блоке 17 строится доказательство этой АП-теоремы.

Поскольку рассматривается АП-теорема, то построение ее доказательства означает получение для заданного антецедента причины вытекающего из него консеквента (следствия, детерминированного данной причиной). При этом привлекаются фреймы типа «ситуация каузирует постановку задач». Полученные в результате консеквенты представляют собой описания событий, необходимо обусловленных другими событиями, в качестве которых выступают факты реализации подцелей, выбранных в блоке 14. Поскольку предполагается, что антецеденты (факты реализации подцелей) осуществлены в некоторые данные моменты времени (в настоящем), то обусловленные ими консеквенты необходимо возникнут в следующие моменты времени (т. е. в будущем). Поэтому полученные в блоке 17 консеквенты представляют собой каузативный прогноз хода развития событий, который и выдается блоком 18. Этот прогноз называется горизонтальным потому, что он строится в пределах одного уровня обобщенности описания.

8. Далее управление передается в блок 19, в котором проверяется, исчерпана ли иерархия подцелей, образующих данный фрейм. Если нет, то происходит переход снова в блок 14, где выбирается очередная (в смысле упорядоченности снизу вверх) подцель из иерархии целей. После этого горизонтальный прогноз описанным выше образом строится уже на следующем уровне обобщенности описания. Этот цикл построения горизонтальных прогнозов повторяется до тех пор, пока не будут исчерпаны все подцели из иерархии, образующей данный фрейм.

9. В случае, когда в блоке 19 обнаружится, что все подцели иерархии для данного фрейма уже исчерпаны, управление передается в блок 20. Этот блок выбирает один из консеквентов, полученных в ходе построения горизонтальных прогнозов. При этом он обращается в блок 17, где эти консеквенты и хранятся.

10. Далее в блоке 21 происходит выбор КЦ-теоремы, консеквент которой совпадает с описанием, выбранным в блоке 20 или в некотором смысле соответствует тому описанию (например, непосредственно его обосновывает). При этом блок 21 обращается к блоку 22, где хранятся все необходимые КЦ-теоремы. После выбора КЦ-теоремы в блоке 23 строится доказательство

этой теоремы. Для случая КЦ-теорем построение их доказательства, как указывалось, означает построение по данному консеквенту (глобальной цели) обосновывающего его справедливости antecedента (развертки цели на подцели, плана (в виде серии подцелей), реализация которого обеспечивает достижение данной глобальной цели).

При этом в качестве консеквентов выступают описания, полученные в результате построения горизонтальных прогнозов. Рассматривать их как глобальные цели, для которых строится развертка на подцели, можно двояким образом. Во-первых, может быть действительно построение плана, реализация которого обеспечивает достижение данной цели, которая необходимо возникнет перед индивидами в будущем, поскольку она детерминирована событиями, имевшими место в настоящем. За горизонтальные прогнозы описывают закономерную смену целей на разных уровнях обобщенности описания.

Во-вторых, построение обоснования консеквента в виде развертки цели можно трактовать и как детализацию соответствующего горизонтального прогноза. В этом случае термин «развертка цели» утрачивает свой первоначальный смысл, поскольку в целях уже речь не идет. Он выступает только в качестве названия для схемы, по которой строится детализация прогноза, которая только чисто внешне напоминает настоящую развертку цели. Горизонтальный прогноз в этом случае описывает не закономерную смену целей, а закономерное развитие событий, управляемое причинно-следственными законами, которые выражаются на разных уровнях обобщенности описания в виде каузативных сетей, связывающих описания событий соответствующего уровня обобщенности.

Далее блок 24 выдает описания событий, построенные в блоке 23, в качестве детализации горизонтальных прогнозов (разверток целей или менее обобщенных описаний тех же событий). После этого в блоке 25 проверяется, исчерпаны ли все консеквенты — горизонтальные прогнозы. Если нет, то управление передается снова в блок 20, который выбирает очередной консеквент — горизонтальный прогноз, для которого, в свою очередь, строится детализация. Цикл построения детализаций горизонтальных прогнозов продолжается, пока не будут исчерпаны консеквенты, полученные в блоке 17, после чего алгоритм заканчивает работу.

**III. Заключение.** Мы описали некоторые возможности языка и их использование для организации работы системы прогнозирования. Конкретное детальное задание всех упомянутых вычислительных массивов теорем — это самостоятельная задача, которая должна решаться на основе содержательного анализа конкретной исследуемой социальной системы, характерных для нее возможных целей индивидов и объективных каузативных закономерностей, управляющих ее функционированием. Для организации

этих массивов теорем посредством разнообразных взаимных ссылок и вызовов необходима формализация человеческих рассуждений о причинах и целях — построение причинной и целевой логик.

Таким образом, массивы теорем одновременно служат формой представления знаний о закономерностях поведения изучаемых социальных систем и формой представления схем построения выводов о различных связях между причинами и следствиями (каузативное (горизонтальное) прогнозирование), целями и подцелями (целевое (вертикальное) прогнозирование). Это моделирует важную особенность организации человеческих знаний о мире, которая заключается в единстве сведений о мире и рассуждений (построение выводов), привлекающих эти сведения, например, для построения прогнозов.

Автор благодарит Д. А. Поспелова за ценные обсуждения, способствовавшие улучшению качества статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноград Т. Программа, понимающая естественный язык. М., «Мир», 1976. 294 с.
2. Пильщиков В. Система ПЛЭНЭР-БЭСМ-6. Методы реализации.— ТР. IV Международной объединенной конференции по искусственному интеллекту. Вып. 7. Технические средства и математическое обеспечение искусственного интеллекта». М., Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика», 1975, с. 89—98.
3. Шепин В. С. Языки программирования для систем управления интегральными работами и задач искусственного интеллекта (обзор).— В кн. Интегральные работы. Вып. 2. М., «Мир», 1975, с. 513—526.
4. Филоник С. А. О построении системы прогнозирования социального поведения на базе семиотических моделей. Часть I. Постановка задачи. Фреймы.— В кн.: «Проблемы бионики». Вып. 20. Харьков, 1978, с. 140—149.

*Поступила 3 января 1977 г.*

УДК 62.506.2

*В. И. ПОТАПОВ, д-р техн. наук*

#### ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НЕЙРОНОПОДОБНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОДОВОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЛОГИКИ НА МАГНИТО-ТИРИСТОРНЫХ СХЕМАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА

В работе [1] описаны принципы технической реализации моно- и многофункциональных нейроноподобных элементов (НЭ) без пресинаптического и с пресинаптическим взаимодействием с переменными весовыми коэффициентами  $\omega_{ij}$  синапсов ( $i$  — число синапсов,  $l$  — число различных весов данного синапса) и переменным порогом  $T_v$  ( $v = 1, 2, \dots$ ) срабатывания НЭ на магнито-диодных переключателях тока. При наличии известных достоинств

схемы НЭ на магнитно-диодных переключателях тока обладают некоторыми недостатками, к числу которых относятся относительно низкая технологичность, препятствующая микроминиатюризации многовиткового дросселя (50—100 витков), невозможность считывания информации без разрушения состояния логического элемента и относительно низкое быстродействие (работа в четыре такта при тактовой частоте не более 500 кГц).

Отмеченные недостатки ограничивают в известных пределах сферу применения на практике в качестве логических элементов кибернетических и вычислительных устройств схем НЭ

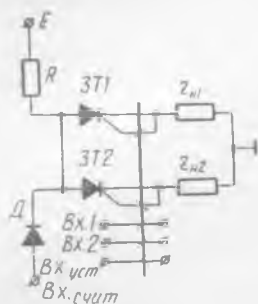


Рис. 1.

на магнито-диодных переключателях тока. В связи с этим целесообразно рассмотреть более прогрессивный с точки зрения технологии и быстродействия принцип технической реализации многофункциональных НЭ с кодовой перестройкой логики за счет дискретного изменения  $\omega_{н1}$  и  $T_v$  на магнитотристорных элементах распределения тока [2], которые, обладая практически всеми достоинствами схем на магнито-диодных переключателях тока, позволяют в значительной степени устранить отмеченные недостатки последних.

Основными компонентами магнитотристорных логических элементов являются запираемые по управляющему электроду тиристоры и трансформаторы на миниатюрном сердечнике с ППГ [3].

Для построения многофункциональных НЭ целесообразно пользоваться в качестве базового элемента трехтактную магнитотристорную логическую схему, изображенную на рис. 1, в качестве элементов памяти использованы запираемые тиристоры  $3T_1$  и  $3T_2$ . Постоянный ток удержания тиристора в открытом состоянии подается через резистор  $R < E/J_{\text{выкл}}$ , величина сопротивления которого выбирается из условия двустабильной работы схемы, а диод  $D$ , через который подается тактовый импульс считывания, служит для развязки элементов постоянному току.

Работа логического элемента происходит следующим образом. В первом такте на вход установки начального состояния «уст.» подается установочный импульс. При этом отпирается тиристор  $3T_2$  и запирается тиристор  $3T_1$ . По окончании импульса установки приобретенное состояние «0» запоминается, так как через резистор и открытый тиристор  $3T_2$  протекает ток, препятствующий току выключения  $J_{\text{выкл}}$ . Если тиристор  $3T_1$  был закрыт, а  $3T_2$  открыт, то в такте установки подтверждается исходное состояние элемента.

Во втором такте также происходит запись информации. При подаче на вход «Вх. 1» положительного импульса отпирается тиристор  $3T_1$  и запирается тиристор  $3T_2$ . При этом логический элемент

мент принимает состояние «1». Если в такте записи импульс на входе «Вх. 1» отсутствует, то элемент сохраняет состояние, полученное в такте установки.

В третьем такте на вход «Вх. счит.» подается импульс считывания, который в зависимости от состояния тиристорных ЗТ<sub>1</sub> и ЗТ<sub>2</sub> приходит на прямой выход («Вых. 1») или на инверсный выход («Вых. 2»).

При использовании входов «Вх. уст.» и «Вх. 1» и выходов «Вых. 1» и «Вых. 2» элементом могут быть реализованы логические функции «Тождество» и «Инверсия». Логическая функция «ИЛИ» от двух переменных реализуется в случае, если во втором такте положительные импульсы подаются на входы «Вх. 1» и «Вх. 2», а считывание производится с выхода «Вых. 1». При считывании с выхода «Вых. 2» осуществляется инверсия логической суммы входных сигналов, поступивших на входы «Вх. 1» и «Вх. 2».

Реализация элементом логической функции «И» возможна в виде инверсии логической суммы инверсий входных сигналов. Для этого на входы «Вх. 1» и «Вх. 2» во втором такте подаются инверсии входных сигналов, а считывание производится в третьем такте с выхода «Вых. 2».

Из сказанного ясно, что приведенный на рис. 1 магнито-тиристорный логический элемент легко может быть использован для построения блока пресинаптического взаимодействия любого типа НЭ. Для обеспечения надежной работы и реализации достоинств магнито-тиристорных элементов в схемах распределения тока необходимо, чтобы длительность тактовых импульсов превышала время запираания тиристора, а сами тиристоры обладали следующими свойствами.

1. Ток и напряжение спрямления должны быть близки по своей величине соответственно току и напряжению запираания.

2. Время запираания должно составлять от нескольких десятых долей до одной микросекунды.

3. Ток выключения должен быть мал (не более 1 ма), чтобы обеспечить экономичную работу элемента.

Тиристор должен сохранять включенное состояние при условии короткого замыкания между управляющим электродом и катодом.

5. Для повышения помехоустойчивости элемента необходимо, чтобы тиристор имел малую величину отношения минимального сигнала, необходимого для его переключения, к максимальному сигналу, при котором переключения не происходит.

Перечисленными свойствами обладают планарно-эпитаксиальные тиристоры.

На базе рассмотренного магнито-тиристорного логического элемента были разработаны принципы синтеза сложных цепей распределения тока, которые легли в основу построения многофункциональных НЭ с кодовой перестройкой логики. Для пояс-

нения основ их технической реализации ограничимся рассмотрением принципиальной схемы и принципа работы магнито-теристорного многофункционального НЭ с переменными весовыми коэффициентами синапсов и переменным порогом (рис. 2), соответствующей схеме многофункционального НЭ без блока пресинаптического воздействия [2].

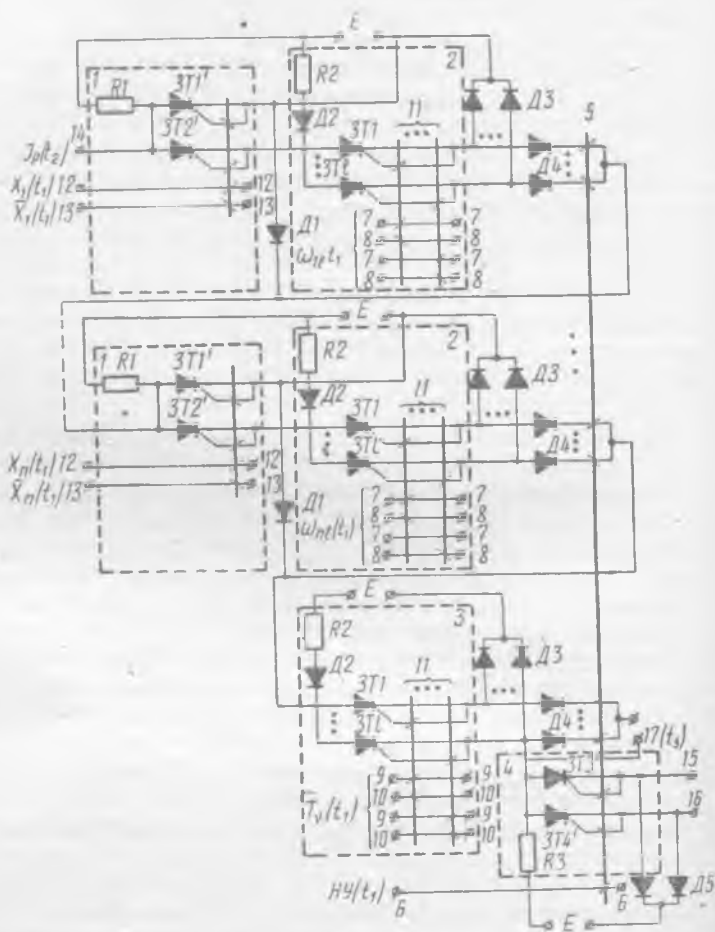


Рис. 2.

Многофункциональный НЭ (рис. 2) содержит узлы 1 ввода переменных  $x_i$  и соответствующие им узлы 2 ввода кода весовых коэффициентов  $\omega_{ii}$  по числу синапсов  $i$  НЭ, узел 3 ввода кода порога  $T_n$ , узел 4 формирования выходного сигнала НЭ и пороговый сердечник 5. Число запираемых тиристоров  $3T_1 \div 3T_n$  узлах ввода кода весовых коэффициентов и в узле ввода кода

порога определяется соответственно количеством весовых коэффициентов у данного синапса и количеством значений порога.

Работа рассматриваемого многофункционального НЭ осуществляется в три такта. В первом такте по шине 6 — 6 (НУ) производится начальная установка «вверх» порогового сердечника 5 вводятся коды весовых коэффициентов по шинам 7 — 7, 8 — 8 и код порога по шинам 9 — 9, 10 — 10. При этом сердечники 11 узлов ввода кода весовых коэффициентов и узла ввода кода порога, связанные при помощи управляющих обмоток с соответствующими шинами 7 — 7 и 9 — 9, перематничиваются «вверх», а сердечники 11, связанные с соответствующими шинами 8 — 8 и 10 — 10, перематничиваются «вниз».

При перематничивании сердечников 11 и порогового сердечника «вверх» на управляющих электродах соответствующих тиристоров  $3T_1$  —  $3T_l$  и на управляющем электроде тиристора  $3T_3$  в узле формирования выходного сигнала наводятся положительные импульсы и происходит их включение. При этом через включенные тиристоры в каждой группе  $3T_1$  —  $3T_l$  протекают токи удержания по цепи: положительный полюс источника питания  $E$  — резистор  $R_2$  — разделительный диод  $D_2$  — открытый тиристор из числа  $3T_1$  —  $3T_l$  — разделительный диод  $D_3$  — отрицательный полюс источника питания  $E$ , а через включенный тиристор  $3T_3$  ток удержания протекает по цепи: положительный полюс источника питания  $E$  — резистор  $R_3$  — тиристор  $3T_3$  — разделительный диод  $D_5$  — отрицательный полюс источника питания  $E$ . Токи удержания тиристоров в открытом состоянии определяются сопротивлением их анодных резисторов.

При прохождении по шинам 8 — 8 и 10 — 10 импульса тока, перематничивающего сердечник 11 «вниз», на управляющих электродах соответствующих тиристоров наводятся отрицательные импульсы и эти тиристоры выключаются.

Указанным способом по каждому синапсу вводится соответствующий весовой коэффициент  $\omega_{ij}$  и порог  $T_v$ , величина и знак каждого из которых определяются числом витков и направлением намотки соответствующих обмоток на пороговом сердечнике 5.

В этом же такте ( $t_1$ ) по шинам 12 — 12 и 13 — 13 вводятся, соответственно, прямые и инверсные значения входных переменных. При подаче прямого значения переменной на  $i$ -й вход в соответствующем узле ввода переменных включается тиристор  $3T_2$ , ток удержания которого протекает по цепи: положительный полюс источника питания  $E$  — резистор  $R_1$  — тиристор  $3T_2$  — соответствующий открытый тиристор  $3T_1$  —  $3T_l$  и диод  $D_3$  — отрицательный полюс источника питания. При подаче инверсного значения переменной включается тиристор  $3T_1$ , ток удержания которого протекает по цепи: положительный полюс источника питания  $E$  — резистор  $R_1$  — тиристор  $3T_1$  — отрицательный полюс источника питания.

Во втором такте производится реализация на пороговом сердечнике 5 логической функции, на которую настроен НЭ. Для этого на клемму 14 подается импульс тока реализации  $J_p$ , который при передаче прямого значения переменной  $x_i$  на  $i$ -й вход проходит через включенный на этом входе тиристор  $3T_2$ , соответствующий открытому тиристор  $3T_1 - 3T_i$  и через соединенную с ним последовательно обмотку записи весового коэффициента  $\omega_{ii}$ . Если на  $i$ -й вход подано инверсное значение переменной  $x_i$ , то импульс тока реализации  $J_p$  проходит через соответствующий включенный тиристор  $3T_1$  и разделительный диод  $D_1$ , минуя обмотку записи весовых коэффициентов  $i$ -го синапса. Последнее эквивалентно введению нулевого весового коэффициента для инверсного значения переменной. Проходя по соответствующей пороговой обмотке, импульс тока реализации  $J_p$  вводит на пороговый сердечник 5 требуемую величину порога  $T_v$  в соответствии с заданным по шинам 9—9 и 10—10 кодом.

Если  $\sum_{i=1}^n \omega_{ii} x_i \geq T_v$ , то пороговый сердечник 5 останется переманчивенным «вверх» и тиристор  $3T_3$  в узле формирования выходного сигнала сохранит свое включенное состояние; если  $\sum_{i=1}^n \omega_{ii} x_i < T_v$ , то пороговый сердечник 5 переманчивается «вниз» в результате чего тиристор  $3T_3$  перейдет в запертое состояние, а тиристор  $3T_4$  — в открытое.

В третьем такте путем подачи импульса считывания  $J_{сч}$  на клемму 17 происходит считывание реализованной функции, при этом на выходной клемме 15 формируется ее прямое  $f_{iv}(x_1, \dots, x_n)$ , а на выходной клемме 16 — инверсное  $\bar{f}_{iv}(x_1, \dots, x_n)$  значение.

В дальнейшем при отсутствии необходимости перестройки логики НЭ код настройки весовых коэффициентов  $\omega_{ii}$  и порога больше не подается, так как предыдущая настройка НЭ сохраняется за счет включенных тиристоров из числа  $3T_1 - 3T_i$  в узле ввода кода весовых коэффициентов и порога (рабочий режим). При необходимости перестройки логики НЭ в очередном такте на клеммы 7—7, 8—8, 9—9, 10—10 подается новый код перестройки, который аналогично предыдущему запоминается открытыми тиристорами  $3T_1 - 3T_i$ .

Если условия работы вызывают значительную нестабильность длительности импульсов входных переменных и кода установки весовых коэффициентов синапсов, то настройку многофункционального НЭ на реализацию требуемой функции и ввод входных переменных следует разнести по тактам. Тогда процесс настройки будет выполняться в четыре такта, а рабочий режим — в три такта.

Из сказанного следует, что быстродействие магнито-тиристорных многофункциональных НЭ на 20—25% выше описанных.

в работе [1] магнито-диодных элементов, при той же тактовой частоте, при этом они содержат в два раза меньше сердечников с ППГ и позволяют осуществлять неразрушающее записанную информацию считывание, что расширяет их возможности при построении сложных вычислительных и логических структур.

Исследования показали, что в магнито-тиристорных схемах возможно использование миниатюрных (с внешним диаметром менее 2,5 мм) сердечников с небольшим (1 ÷ 5) числом витков, так как для управления тиристором требуется достаточно малая мощность (порядка десятков микроватт), а токи записи и считывания могут иметь большую амплитуду (до нескольких ампер) вследствие высокой нагрузочной способности тиристоров. В связи с этим открываются технические возможности для миниатюризации магнито-тиристорных многофункциональных НЭ и ФН с кодовой перестройкой логики в виде гибридных схем средней и даже большой интеграции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапов В. И., Миренков П. В. О структурной сложности и технической реализации формальных нейронов на магнитных токовых переключателях.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 10. Харьков, 1973, с. 3—15.
2. Потапов В. И., Пальянов И. А. Многофункциональный пороговый модуль с кодовой перестройкой логики. Авт. свид. № 493031. — «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1975, № 43.
3. Горохов В. А., Шедрин М. Б. Тиристоры в импульсных схемах. М., «Сов. радио», 1972. 304 с.

*Поступила 19 февраля 1977 г.*

УДК 62.506.2

Ф. Х. ФАЙЗУЛЛИН

#### УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПОЗНАЮЩЕЙ ОДНОРОДНОЙ НЕЙРОПОДОБНОЙ СЕТИ

Анализ практических средств, наиболее перспективных для создания высокоэффективных, универсальных и оптимальных систем распознавания образов, приводит к выводу, что такой базой могут быть нейроподобные сети, оптимальным образом сочетающие в себе биологические предпосылки с достоинствами технических однородных сред [1, 2].

На основании данного вывода, а также путем изучения поведения моделируемой системы после постулирования ее структуры в качестве методологического принципа было разработано и изготовлено опознающее устройство на базе однородной нейроподобной сети [3].

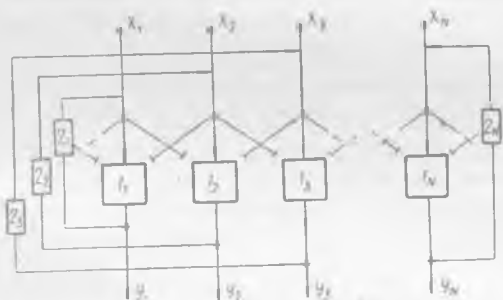
Устройство способно опознавать форму некоторого набора непрерывных случайных величин с любой моделируемой плотностью распределения и запоминать опознанную форму динамическим способом.

На рисунке показан один из вариантов нейронной сети в виде однородного слоя, опознающей и запоминающей  $N$ -мерные сигналы, где  $I_1 - I_N$  — нейроподобные элементы (возбуждающие входы обозначены стрелками, тормозные — Т-образными линиями)  $2_1 - 2_N$  — цепи обратной связи.

В качестве модуля для построения однородной нейроподобной сети (ОНС) используется аналого-дискретная модель нейрона, выходной сигнал которого в первом приближении можно описать выражением

$$Y = \begin{cases} Y_{\max} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{V - V_0}{\tau}\right) \right], & V \geq V_0 \\ 0, & V < V_0. \end{cases}$$

Здесь  $V = \varphi(x_j \omega_j)$  — аналог мембранного потенциала, имеющего



различное аналитическое выражение в зависимости от поставленных задач;  $V_0$  — порог;  $x_j$  — компоненты входного сигнала;  $\omega_j$  — вес  $j$ -го синапса;  $Y_{\max}$  и  $\tau$  — постоянные, определяющие вид передаточной характеристики модуля.

В основу построения опознающего устройства положены следующие общие принципы организации технических однородных сред и нейроподобных образований: конструктивная однородность, параллельность обработки информации, латеральное торможение, обратные связи, пластичность синапсов.

Объектами опознавания являются наборы непрерывных величин (сигналы). Каждый из наборов содержит одно и то же число пронумерованных в определенном порядке компонент (случайных величин). Число компонент (признаков) конечно и равно числу входов ОНС. Классом (образом) является компактное множество сигналов, определяемое некоторым конечным числом общих свойств. Эти свойства объединяют сигналы в один класс, а также позволяют отличать их от сигналов другого класса. Параметры классов (диапазон изменения сигналов, плотность распределения, координаты центров областей, степень их перекрытия и др.) задаются и изменяются по опре...

ленному плану в соответствии с поставленной задачей выявления структуры опознающей сети и ее возможностей. Под распознаванием (классификацией) понимается процедура отнесения какого-либо сигнала к одному из классов.

Моделирование и исследование возможностей опознающей нейронной сети производится в следующей последовательности: задаются классы сигналов; постулируется исходная структура опознающей сети; на входы ОНС заданного типа случайным образом подается некоторое число сигналов (обучающая выборка), принадлежащих разным классам; параметры сети меняются до тех пор, пока можно будет по результатам обработки принять решение о проведенной классификации; анализируется выявленная структура опознающей сети и оценивается ее эффективность.

Описываемое устройство опознает форму сигнала и обобщает изменения формы в пределах данного класса благодаря механизму латерального торможения, циклически подает результат обработки с выходов слоя по обратным связям снова на его входы. При этом латеральное торможение контрастирует и уменьшает размерность входного сигнала, а многократное повторение этого процесса при определенных параметрах нейронов приводит к некоторому установившемуся режиму, когда компоненты циркулирующего сигнала не изменяются во времени. Опознанная форма сигнала запоминается динамическим способом в виде непрерывной циркуляции сигнала в нейронном слое.

Время циркуляции сигнала до установившегося режима (время распознавания) зависит от параметров нейронов и латеральных связей. В частности, при заданной величине надежности распознавания это время уменьшается с увеличением  $V_0$  и  $Y_{\max}$ , с уменьшением параметра  $\tau$ , с увеличением отношения весов возбуждающих и тормозящих связей  $\omega_B/\omega_T$  в определенных диапазонах их изменения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галушкин А. И. Синтез многослойных систем распознавания образов. М., «Энергия», 1974. 368 с.
2. Файзуллин Ф. Х. Исследование однородных нейроподобных сетей, предназначенных для распознавания образов. Автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Киев, 1975.
3. Файзуллин Ф. Х. и Костылева Б. К. Устройство для моделирования нейронной сети. Авт. свид. № 528579. — «Бюл. изобретений», 1976, № 34.

*Поступила 10 апреля 1977 г.*

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОГОЛОГРАФИЧЕСКИХ  
МОДЕЛЕЙ НЕРВНЫХ СТРУКТУР. СООБЩЕНИЕ 4

При обычной регистрации изображений, формируемых с помощью линз, осуществляется (в пределах разрешающей способности оптической системы) взаимно-однозначное отображение каждого точечного элемента оригинала в точечный элемент изображения. Однако при использовании некогерентного света такое соответствие имеет место только для сопряженных плоскостей при обычной регистрации светового потока, попадающего через входное окно оптической системы.

Между тем информация об отображаемом оригинале может быть получена в любом из сечений, например плоском, в области пространства, окружающей наблюдаемый объект. Об этом свидетельствует возможность получения изображения (действительного или мнимого) с помощью линзы, расположенной в любой плоскости на пути светового потока, исходящего от предмета. Обычные методы регистрации светового потока и освещения объектов при использовании некогерентного света не позволяют воспользоваться информацией об изображении объекта, имеющейся в любой плоскости, расположенной между объектом и линзой и сопряженной объекту плоскостью и в области за сопряженной объекту плоскостью.

Невозможность обратимой регистрации изображений в указанных областях определяется двумя основными причинами. Одна из них состоит в том, что эквивалентная функция рассеяния оптической системы является гладкой колоколообразной функцией (точное аналитическое описание ее пока безразлично). Только для сопряженных плоскостей оптической системы с собирающей линзой эффективная площадь функции рассеивания стягивается в «точку», размеры которой определяются разрешающей способностью системы.

Неточечность функции рассеяния для указанных плоскостей является причиной того, что световой поток от каждого точечного элемента самосветящегося объекта распределяется почти равномерно на значительную площадь в плоскости регистрации на пути светового потока. Это приводит к необратимой потере высоких пространственных частот изображения и необратимости преобразования сигнала, превращаемого в почти равномерный фон.

Вторая причина необходимости преобразования «сглаженного» по высоким пространственным частотам сигнала заключается в том, что при регистрации такого сигнала обычным способом полностью утрачивается информация о направлении хода регистрируемых пучков лучей.

В предыдущих сообщениях настоящей работы\* описана возможность перехода при записи изображений от гладких функций рассеяния к дискретизированным, имеющим один сильно выраженный максимум автокорреляционной функции. Физическая реализация таких функций рассеяния осуществлялась с помощью апертурных масок с необходимым распределением прозрачности, обеспечивающих обратимое кодирование изображений. Апертурные маски размещались на пути светового потока от самосветящегося объекта к плоскости регистрации. Однако при записи самосветящихся объектов в рассмотренной ранее системе не удастся обеспечить только взаимно-однозначное соответствие между оригиналом и его восстановленным образом из-за невозможности восстановления направления хода пучков лучей, имевших место при записи. Здесь фиксируемый предмет и источник света оказываются совмещенными в одном объекте. Отсутствие оригинала при восстановлении по его образу приводит к необходимости использования другого источника света, неизбежно порождающего посторонние пучки лучей и следы этих пучков в плоскости восстановления полезного сигнала.

Другими словами, при восстановлении исходного изображения применялся отдельный источник. Каждая точка регистрируемого изображения при записи формировалась от световых пучков, приходивших под определенным углом к плоскости регистрации. При воспроизведении каждая точка изображения становилась диффузным источником света, содержащим пучки лучей, которых не было при записи. Это приводило к формированию фоновой составляющей при воспроизведении, уменьшающей контраст полезного сигнала.

В настоящем сообщении рассматривается улучшенный вариант многолучевой записи изображений, обеспечивающий «запоминание» направления хода пучков лучей, имевшихся при записи. При голографической записи изображений обеспечивается полное восстановление исходного волнового фронта благодаря использованию воспроизводимого опорного источника когерентного излучения. Применение многослойных апертурных масок позволяет создать аналог опорного освещения. Если этот источник используется и при записи, и при воспроизведении, то появляется возможность более полного восстановления исходного волнового фронта с сохранением первоначального хода пучков лучей, имевших место при записи.

Как известно, в фокальной плоскости объектива интегрируются параллельные пучки лучей, попадающих в оптическую систему. При этом в каждой точке фокальной плоскости, отстоящей от

---

\* Бахтигозин В. А., Бугай Ю. П., Куманин Ю. А., Червов В. Г. Оптическая система для исследования биологических моделей нервной системы. *Сообщение 1, 2.* — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 16. Харьков, 1976, с. 66—78.

Преобразование, осуществляемое в такой системе, аналогично (2) с дополнительным множителем под интегралом, который описывает влияние второй маски:

$$F(\vec{x}) = \int_{R^2} d\vec{x}' Q(\vec{x}') M_1(\vec{x}' - k_1\vec{x}) M_2(\vec{x}' - k_2\vec{x}). \quad (4)$$

Здесь  $k_2 = l_2/f$  (рисунок).

Процесс восстановления описывается интегральным преобразованием

$$\vec{Q}(\vec{x}') = \int_{R^2} d\vec{x} F(\vec{x}) M_1(\vec{x}' - k_1\vec{x}) M_2(\vec{x}' - k_2\vec{x}). \quad (5)$$

Подставляя выражение (4) в (5) и изменяя порядок интегрирования, получаем выражение, аналогичное (3):

$$\vec{Q}(\vec{x}') = \int_{R^2} d\vec{x}'' Q(\vec{x}'') G(\vec{x}'', \vec{x}'). \quad (6)$$

Функция  $G(\vec{x}'', \vec{x}')$  может рассматриваться в качестве аппроксимации  $\delta$ -функции ввиду ее хороших фильтрующих свойств, позволяющих восстанавливать входной сигнал  $Q(\vec{x})$ . Однако структура функции

$G(\vec{x}'', \vec{x}')$  сложнее обычной корреляционной функции

$$G(\vec{x}'', \vec{x}') = \int_{R^2} d\vec{x} M_1(\vec{x}'' - k_1\vec{x}) M_2(\vec{x}'' - k_2\vec{x}) M_1(\vec{x}' - k_1\vec{x}) M_2(\vec{x}' - k_2\vec{x}). \quad (7)$$

В случае  $k_1 = k_2 = k$ , что означает  $l_1 = l_2$  (см. рисунок), имеем вариант «произведения» двух масок в одной плоскости. Ранее нами был рассмотрен пример такой комбинации для шумоподобной маски и зонной решетки Френеля. Функция  $G(\vec{x}'', \vec{x}')$  совпадает тогда с автокорреляционной функцией для произведения двух масок и функционирует так же, как и одна маска, но с иным распределением плотности прозрачности: по закону распределения произведения плотностей прозрачности отдельных масок. В этом случае замена переменных  $\vec{x}' - k_1\vec{x} = \vec{y}$  приводит к

$$G(\vec{x}'', \vec{x}') = k \operatorname{cor} (M_1 M_2, M_1 M_2). \quad (8)$$

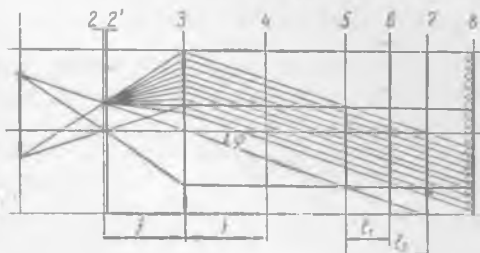


Схема оптического устройства для квазиголографической записи и воспроизведения изображений:

1 — плоскость восстановленного изображения; 2, 4 — фокальные плоскости объектива; 2 — плоскость регистрации квазиголограммы; 3 — объект; 5 — объект; 6 — маска  $M_1$ ; 7 — маска  $M_2$ ; 8 — источник диффузного освещения;  $f$  — фокусное расстояние объектива;  $l_1, l_2$  — расстояния между масками и объектом.

Для уяснения эффекта разнесения двух масок вдоль оптической оси, что соответствует  $k_1 \neq k_2$ , выделим из выражения (7) часть, соответствующую (8). Разложим  $M_2(\vec{x})$  по степеням  $(k_1 - k_2)\vec{x} = \vec{h}$  и возьмем линейную часть разложения. После замены переменных, как в формуле (8), получим

$$\begin{aligned}
 G(\vec{x}'', \vec{x}') &\approx k_1 \int_{R^2} dy \vec{M}_1(\vec{y}) M_1[(\vec{x}'' - \vec{x}') + \vec{y}] \{M_2(\vec{y}) + \\
 &+ M_2(\vec{y}) \vec{h}\} \{M_2[(\vec{x}'' - \vec{x}') + \vec{y}] + M_2[(\vec{x}'' - \vec{x}') + \vec{y}] \vec{h}\} \approx \\
 &\approx k_1 \{ \text{cor} [M_1 M_2, M_1 M_2] + \text{cor} [M_1 M_2 \vec{h}, M_1 M_2 \vec{h}] + \\
 &+ \text{cor} [M_1 M_2, M_1 M_2 \vec{h}] + \text{cor} [M_1 M_2 \vec{h}, M_1 M_2] \}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Первое слагаемое в полученном выражении совпадает с (8). Остальные слагаемые могут обеспечивать различные эффекты в зависимости от конкретной структуры используемых масок. Обычно в эксперименте наблюдается сглаживание высокочастотных составляющих фона при восстановлении изображения объекта.

С другой стороны, формула (9) отражает принципиально новый эффект, возникающий при использовании масок, разнесенных относительно одна другой. Процесс кодирования становится неоднородным. Функция  $G(\vec{x}'', \vec{x}')$  уже не является ядром с разностным аргументом. В (9) от разности  $\vec{x}'' - \vec{x}'$  полностью зависит лишь первое слагаемое — остальные этим свойством не обладают. Неоднородность тем заметнее, чем большие значения принимает величина  $\vec{h}$ , которая линейно связана с величиной расстояния между масками. Последнее свойство позволяет, например, производить запись на один носитель нескольких квазиголограмм разных объектов путем использования одного и того же комплекта масок, смещая их каждый раз в их плоскостях. После этого объекты могут быть избирательно восстановлены с одного носителя.

В дальнейшем предполагается продолжать исследования в направлении использования новых возможностей метода. Интересные результаты, по-видимому, могут быть получены и при составлении описанной модели с динамикой процессов распределенного кодирования образов в зрительном анализаторе, где имеются довольно веские основания предполагать использование небольшого набора «масок» при одновременном сохранении гибкости и избирательности системы в целом.

*Г. А. КОЛОТЕНКО, Г. И. ЕВТУШЕНКО*, д-р мед. наук,  
*С. Ю. ДИДЕНКО*, канд. техн. наук

## МОДИФИКАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ АНАЛИЗА СИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СВЯЗЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Существующая многоканальная аппаратура для анализа ЭЭГ позволяет получить лишь часть полезной информации, но не в состоянии проанализировать иерархию переменных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга.

Гомоморфное моделирование с помощью логических элементов дает возможность осуществить системный кибернетический анализ и синтез необходимого множества ЭЭГ отведений. Тем самым расширяются методические средства интегративного и дифференциального анализа потенциалов головного мозга, распределенных в пространстве и времени. Можно комплектовать лонсковые программы клинических, экспериментальных, медико-биологических исследований. Появляется возможность выявить специфические особенности функционирования церебральных систем и структур. Эти особенности могут быть использованы в бионических устройствах, комплексах и системах.

Цель настоящей статьи — описание модификаций многоканального логического устройства для кибернетического анализа доминантных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга. Это устройство позволяет уточнить функциональную зависимость между стимулом и ответом.

Материал статьи основан на анализе системы импульсного возбуждения целостного мозга, проявляющейся в одной из форм — биоэлектрической активности головного мозга.

Известен ряд анализирующих устройств, которые используют элементы алгебры логики в качестве преобразователей кодов [1], вспомогательных узлов [2, 3]. В последних вариантах [2, 3] пары входных биосигналов сравниваются в логическом и запоминающем триггерном блоке. При одинаковой полярности триггер запускается, измеритель фиксирует «1». Если сигналы имеют противоположную полярность, то триггер переходит в исходное состояние и измеритель показывает «—1».

Усовершенствуя автоматический анализ множества параллельных ЭЭГ волн [4], мы предлагаем многоканальное логическое устройство. Сущность его заключается в том, что на входе каждого ЭЭГ канала параллельно включены усилители биопульсов положительной и отрицательной полярности. Выходы этих усилителей подключены к нуль-органам, которые снабжены регулировкой потенциального уровня опорного эталонного

напряжения и к соответствующим входам блока логики, связанного своими выходами со счетными входами триггеров блока счета (или регистром ЭВМ).

В первой модификации блок логики содержит пары логических элементов «И» и «ИЛИ», каждая из которых имеет общие входы  $a$  ( $a = 2, 3, 4, \dots, n$ ). При этом входы одной пары логических элементов связаны с соответствующими выходами усилителей положительной полярности, а входы второй пары — с соответствующими выходами усилителей биоимпульсов отрицательной полярности.

При появлении ЭЭГ волн в различных сочетаниях на входах нуль-органы формируют импульсы, соответствующие превышению уровня исследуемых потенциалов над уровнем заранее заданного опорного напряжения. Сформированные серии импульсов подаются на схемы «И», «ИЛИ» в сочетаниях  $c_n^2, c_n^3, \dots, c_n^n$ . Сигналы на выходах схем «И» соответствуют наличию переменных синфазных пространственно-временных связей головного мозга. Сигналы на выходах схем «ИЛИ» характеризуют системы асинхронных пространственно-временных связей головного мозга.

Как видно, функциональные связи анализирующего многоканального логического устройства характеризуются сочетаниями. Одно сочетание пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга положительной и отрицательной полярности отличается от другого, по крайней мере, одной связью. Сочетания показывают не только количество входов схем, но и варианты связей головного мозга при равном количестве входов.

Во второй модификации блока логики параллельно схемам конъюнкции и дизъюнкции коммутируются схемы «И — НЕ» в различной комбинации входов, учитывающих инвариантность био-сигналов разной полярности согласно индексации ЭЭГ. К входам «И — НЕ», подсоединенным к выходам усилителей отрицательной полярности, последовательно подключены эмитерные повторители в инверсном режиме. Например, если исследуются ЭЭГ каналов 1, 2, то схемы «И — НЕ», подключаясь к плечу независимо от полярности, должны учитывать два варианта появления пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга положительной и отрицательной полярности. Если в пространственно-временную организацию синхронных потенциалов головного мозга, разной полярности включена пространственно-временная организация положительного асинхронного потенциала головного мозга ЭЭГ отведения 1 и отрицательного потенциала отведения 2, то схема «И — НЕ» индексируется (1(+), 2(-)). Если же наоборот, то схема «И — НЕ» подключается по индексации (1(-), 2(+)). В первом случае эмитерный повторитель включен в канал 2(-), во втором — в 1(-). Аналогично рассматриваются варианты подключения  $a$  входов ( $a = 1, 2, \dots, n$ ) схем «И — НЕ».

Схемы «И — НЕ» позволяют объединить подсистемы асинхронных и синхронных связей головного мозга различной полярности

в системы синхронных связей головного мозга. Они принципиально отличаются от систем совмещенных и спектральных синхронных связей головного мозга положительной и соответственно отрицательной полярности, полученных при помощи схем «И».

В одной из модификаций многоканального логического устройства для кибернетического анализа переменных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга вместо регулируемого эталонного напряжения включали высокостабильный источник постоянного напряжения  $\Delta u$ . Последний, суммируясь с регулируемым напряжением  $u_p$ , позволял устанавливать пороговое напряжение  $u_{пор}$ , выше которого происходил автоматический анализ переменных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга:

$$|\Delta u| = |u_{пор}| - |u_p|.$$

Исследуем параметры последней модификации многоканального логического устройства. Они позволяют раскрыть методические средства используемых в разработанном устройстве элементов алгебры логики.

При  $\Delta u \neq u_{пор}$  модули напряжений  $|\Delta u|$  и  $|u_p|$  обратно пропорциональны, а при условии равенства модулей  $|u_p| = |\Delta u|$  — в два раза меньше абсолютной величины порогового напряжения:

$$|\Delta u| = |u_p| = \frac{1}{2} |u_{пор}|.$$

Рассматривая инверсию  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ , ... как системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга равной величины, но противоположной полярности, можно указать, например, на следующие закономерности.

1. Системы пространственно-временных синхронных связей головного мозга, характеризующиеся признаками вариационного ряда  $c_n^2$ , включают подсистемы асинхронных связей положительной полярности, которым соответствуют инверсные системы асинхронных связей отрицательной полярности. При условии  $|\Delta u| \geq |u_{пор}|$ ;  $|\Delta u| + |u_p| \geq |u_{пор}|$  с учетом подключения эмитерного повторителя в инверсном режиме для логической схемы «И — НЕ» справедливо равенство  $\bar{A} \vee \bar{A} \simeq A \wedge \bar{A} \simeq 1$ .

2. Если две пары систем пространственно-временных синхронных связей головного мозга положительной полярности  $A \vee B$ ,  $\bar{A} \vee c$  и синхронных связей  $A \wedge B$ ,  $\bar{A} \wedge c$ , включающих две подсистемы асинхронных связей, одна из которых в инверсном режиме, то согласно эквивалентности в процессе кодирования систем могут быть проведены эквивалентные преобразования:  $(A \vee B) \wedge (\bar{A} \vee c) = A \wedge c \vee \bar{A} \wedge B$ .

В блок логики можно включить схемы, удовлетворяющие формальным теоремам алгебры логики:  $A \vee 1 = 1$ ;  $A \wedge (A \vee B) = A$ ;  $A \vee (A \wedge B) = A$ ;  $\overline{\overline{A}} = A$ ;  $\overline{(A \vee B)} = \overline{A} \wedge \overline{B}$ ;  $(A \wedge B) \wedge c = A \wedge (B \wedge c)$ ;  $(A \vee B) \vee c = A \vee (B \vee c)$ ;  $A \vee \overline{A} \wedge B = A \vee B$ ;  $(A \vee B) \wedge (\overline{A} \vee c) = (A \wedge c) \vee (\overline{A} \wedge B)$ ;  $(A \wedge c \vee B \vee \overline{c}) = \overline{A} \wedge c \vee \overline{B} \vee \overline{c}$ ;  $(A \wedge c) \wedge (B \vee \overline{c}) = (\overline{A} \wedge c) \wedge (\overline{B} \vee \overline{c})$ .

Исходя из положения нейрокинетики о том, что начало фаз нейронной импульсации — на разных уровнях активности, на основе предлагаемого устройства можно развивать многоуровневый системный автоматический анализ ЭЭГ. Он позволяет воссоздать интегративную иерархическую пространственно-временную картину нейрональных процессов головного мозга. В предельном случае многоканальной кибернетический анализ переменных пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга позволяет производить количественный анализ множества ЭЭГ отведений на одном амплитудном уровне. Для предлагаемого системного анализа не обязательно совпадение фаз ни на нулевом уровне, ни на пороговом уровне. Важно, чтобы совпадали длительности импульсов. Поэтому можно анализировать не только ЭЭГ колебания, но и профильтрованные физиологические ритмы, например  $\alpha$ -ритм,  $\beta$ -ритм и т. д.

Стимул  $x_i$ , определяющий реакцию  $y_i$ , характеризуемую множеством и подмножеством систем и подсистем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга положительной и отрицательной полярности, в интервале времени  $[t_1, t_2]$  зависит от

а) стимула  $N_1 > N_2 = f(x_i)$  при  $u_{\text{пор}} = \text{const}$ ;

б) реакции  $N_1 > N_2 = f(y_i)$  при  $u_{\text{пор}} = \text{const}$ ;

в) времени  $N_1 > N_2 = f(t)$  при  $u_{\text{пор}} = \text{const}$ .

При изменении порогового уровня меняются множества и подмножества  $l_1, l_2, \dots, l_m$  систем и подсистем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга и структуры связей:  $u_{\text{пор}1} > u_{\text{пор}2} > \dots > u_{\text{пор}i} > \dots > u_{\text{пор}m}$ ;  $l_1 < l_2 < \dots < l_i < \dots < l_m$ .

Количество входов схем «И» и «ИЛИ» можно рассчитать с помощью следующего свойства сочетаний:  $c_n^m = c_n^{n-m}$ . Запишем количество входов логических элементов «И» для переменного анализа десяти ЭЭГ отведений одной полярности:  $c_{10}^2 + c_{10}^3 + c_{10}^4 + c_{10}^5 + c_{10}^6 + c_{10}^7 + c_{10}^8 + c_{10}^9 = 45 + 120 + 210 + 252 + 210 + 120 + 45 + 10 = 1012$ ,  $c_{10}^6 = c_{10}^{10-6} = c_{10}^4$ ,  $c_{10}^7 = c_{10}^3$ .

Блок логики ячеек «И» содержит 2042 входа. Столько же входов содержит логический блок ячеек «ИЛИ». Несколько больше входов у логических схем «И—НЕ», что при использовании субблоков в интегральном исполнении является малой величиной, так как аналогичные субблоки рассчитаны на мил-

лиарды входов. Аналогичная аппаратура оказывается эффективной в проблемных медико-биологических исследованиях. На практике количество входов сокращается на 95—98%. Это происходит при гомоморфном моделировании систем синхронных и асинхронных связей головного мозга в результате устранения избыточной информации, порожденной маловыраженным разнообразием повторяемости этих систем за период ЭЭГ выборки. Иначе говоря, в стандартных медицинских и биологических приборах используют минимизированные блоки логики на три — десять выходов, фиксируя системы синхронных и асинхронных связей головного мозга положительной и отрицательной полярности с вероятностным распределением весов, стремящихся к достоверности.

Исследуем системы доминантных пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, полученные при помощи первой модификации многоканального логического устройства для кибернетического анализа ЭЭГ.

Пусть  $o_1, o_2, o_3, \dots$  — системы асинхронных связей головного мозга зон регистрации 1, 2, 3, ...,  $n$ ;  $c$  — системы пространственно-временных синхронных связей головного мозга, полученные при помощи конъюнкции и отображающие совпадение длительностей импульсов на пороговом уровне без рассогласования во времени;  $A$  — системы связей, включающие множества разнообразных пространственно-временных связей. Эти системы получены при помощи дизъюнкции.

Определим систему асинхронных связей головного мозга  $o_1$ , координируемую положением ЭЭГ отведения 1:  $o_1 + o_2 + o_3 = = A_{123} - c_{123} - c_{12} - c_{23} - c_{13}$ ;  $o_1 = A_{123} - c_{123} - c_{12} - c_{23} - c_{13} - (o_2 + o_3)$ ;  $o_2 + o_3 = A_{23} - c_{23}$ ;  $o_1 = A_{123} - c_{123} - c_{12} - c_{23} - c_{13} - A_{23} + c_{23} = A_{123} - c_{123} - c_{12} - c_{13} - A_{23}$ .

Доминантная система асинхронных связей головного мозга  $o_2$ , координируемая ЭЭГ отведением 2:  $o_2 = A_{123} - c_{123} - c_{12} - c_{23} - c_{13} - (o_1 + o_3)$ ;  $o_1 + o_3 = A_{13} - c_{13}$ ;  $o_2 = A_{123} - c_{123} - c_{12} - c_{23} - c_{13} - A_{13} + c_{13} = A_{123} - c_{123} - c_{12} - c_{23} - A_{13}$ .

Система асинхронных связей головного мозга  $o_3$ , определяемая положением ЭЭГ отведения 3:  $o_3 = A_{123} - c_{123} - c_{12} - c_{23} - c_{13} - (o_1 + o_2)$ ;  $o_1 + o_2 = A_{12} - c_{12}$ ;  $o_3 = A_{123} - c_{123} - c_{12} - c_{23} - c_{13} - A_{12} + c_{12} = A_{123} - c_{123} - c_{23} - c_{13} - A_{12}$ .

Определить те же системы можно из эквивалентных преобразований других сочетаний потенциалов головного мозга, например  $A_{124}$ , входящего в вариационный ряд  $c_n^3$  признаков, при помощи которых эти системы кодируются:  $o_1 + o_2 + o_4 = A_{124} - c_{124} - c_{12} - c_{24} - c_{14}$ ;  $o_1 = A_{124} - c_{124} - c_{12} - c_{24} - c_{14} - (o_2 + o_4)$ ;  $o_2 + o_4 = A_{24} - c_{24}$ ;  $o_1 = A_{124} - c_{124} - c_{12} - c_{24} - c_{14} - A_{24} + c_{24} = = A_{124} - c_{124} - c_{12} - c_{14} - A_{24} = A_{123} - c_{123} - c_{12} - c_{13} - A_{23}$ .  $o_2 = = A_{124} - c_{124} - c_{12} - c_{24} - c_{14} - (o_1 + o_4)$ ;  $o_1 + o_4 = A_{14} - c_{14}$ ;  $o_2 = = A_{124} - c_{124} - c_{12} - c_{24} - c_{14} - (A_{14} - c_{14}) = A_{124} - c_{124} - c_{12} - c_{24} + A_{14} = A_{123} - c_{123} - c_{12} - c_{23} - A_{13}$ .

Логические элементы «И», «ИЛИ» на  $i, j, k$  входа позволяют определять системы асинхронных связей головного мозга по любому  $i, j, k$  ЭЭГ отведению:  $o_i = A_{i,j,k} - c_{i,j,k} - c_{i,j} - c_{i,k} - c_{j,k} - (o_j + o_k)$ ;  $o_j + o_k = A_{j,k} - c_{j,k}$ ;  $o_i = A_{i,j,k} - c_{i,j,k} - c_{i,j} - c_{i,k} - c_{j,k} - (A_{j,k} - c_{j,k}) = A_{i,j,k} - c_{i,j,k} - c_{i,j} - c_{i,k} - A_{j,k}$ .

Из любого сочетания входов логических элементов «И», «ИЛИ», включающих одно  $i$ , два  $i, j$  канала, можно определить  $o_i$  и  $o_j$ .

Допустим, вариация входов логических элементов соответствует сочетанию трех ЭЭГ каналов  $i, l, f$  из  $n$  возможных. Тогда  $o_i = A_{i,l,f} - c_{i,l,f} - c_{i,l} - c_{i,f} - c_{l,f} - (o_l - o_f)$ ;  $o_l - o_f = A_{lf}$ ;  $o_i = A_{i,l,f} - c_{i,l,f} - c_{i,l} - c_{i,f} - A_{lf}$ ;  $o_i = A_{i,l,f} - c_{i,l,k} - c_{i,j} - c_{i,k} - A_{j,k} = A_{i,l,f} - c_{i,l,f} - c_{i,l} - c_{i,f} - A_{l,f} = \dots$

Аналогично для  $o_j, o_k, o_f, \dots, o_n$ .

Исходя из этого можно предположить, что равенства варьируемых компонент систем пространственно-временных синхронных связей головного мозга эквивалентны структурному эффекту систем асинхронных связей. При этом интегральное множество структурных компонент кибернетически анализируемых систем и подсистем синхронных и асинхронных связей головного мозга приходит в такое состояние, при котором обеспечивается наибольшая эффективность этих систем, характеризующая экстремум показателей нейрокибернетического качества.

А. А. Ухтомский писал: «Доминанта есть центр, наиболее легко отзывающийся на давление волны» [5]. В этом аспекте вероятность систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга идентифицирует отношения между активированными центрами головного мозга, обусловленными взаимоотношениями систем импульсного и электротонического возбуждения.

В аппроксимированном виде системы и подсистемы пространственно-временных связей головного мозга моделируются орбиталями, которые в зависимости от иерархического уровня структур могут пересекаться, перекрываться, трансформироваться в новые связи на основе предыдущих. Вероятные системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга «ужесточают» системы связей; маловероятные, флуктуирующие — «размягчают», но в любом случае остаются кооперативными, интегральными связями, основанными на взаимодействии систем импульсного и электротонического возбуждения целостного мозга.

Теория доминанты в нейрокибернетическом аспекте позволяет дифференцировать выраженные системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, отображающих архитектуру совпадений систем разных частот, интегративно функционирующих в объеме головного мозга. Предложенный методический подход позволяет осмыслить некоторые стороны механизма условнорефлекторной деятельности и воспроизвести их при помощи саморегулируемых бионических

устройств, входящих, в частности, составными компонентами в автоматизированные системы управления.

Повышенная возбудимость «нервного прибора» (по Н. Е. Введенскому) в анализируемом плане изображает изохронную и полихронную составляющие систем импульсного возбуждения головного мозга.

Интеграция иерархических структур разнообразных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга (вхождение варьируемых компонент в разные структуры) создает условия для организации этих связей по типу активного поиска, что в некоторых случаях является принципом функционирования самоорганизующихся бионических устройств.

Предложенные модификации многоканальных логических устройств для анализа переменных иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга не исчерпывают всего методического инструментария и не являются единственными или случайно выбранными. Конструкции реализованных технических решений просты. В них применяются многофункциональные интегральные схемы логических элементов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелевский А. В., Лакеев А. М. Анализирующее устройство.— Авт. свид., кл. 42 *m*<sup>3</sup>, 7/38, № 246156. — «Бюл. изобрет.», 1969, № 20.
2. Джон Е. Р., Лауфеймер Р. Электромедицинское устройство.— Авт. свид., МКИ А 61 в 5/04, № 1288398.
3. Джон Е. Р., Лауфеймер Р. Система для анализа электрических волн мозга.— Авт. свид., США МКИ А 61 5/04, № 369 808.
4. Колотенко Г. А. Нейрокибернетическая модель синхронных потенциалов человека в период самовнушения успокоения.— В кн.: Биологическая и медицинская кибернетика. Ч. 3, М.—Л., 1974, с. 94—98.
5. Ухтомский А. А. Собр. соч., т. I, Л., 1950. 281 с.

УДК 62.506.2

Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р техн. наук

#### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НУЛЬ-ОРГАНА В ЛИНГВИСТИКЕ

В одной из статей<sup>1</sup> данного сборника рассматривается применение метода нуля-органа при математическом описании работы органов чувств человека. Этот же метод может быть использован и для математического моделирования процессов переработки человеком языковой информации. Исследование языкового поведения человека методом нуля-органа ведется сле-

<sup>1</sup> Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Применение метода нуля-органа в психофизике. *Сообщение I*. См. статью в настоящем сборнике.

1) распознаватели букв могут действовать только на буквы алфавита  $A$ ; 2) дизъюнкция и конъюнкция не могут действовать на буквы алфавита  $A$ .

Введенная алгебра является полной в том смысле, что с помощью формул этой алгебры могут быть представлены любые обобщенные логические функции. Действительно, любая обобщенная логическая функция  $f$  может быть представлена в виде следующей формулы:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{(s_1, s_2, \dots, s_n)=1} x_1^{s_1} x_2^{s_2} \dots x_n^{s_n}, \quad (2)$$

являющейся аналогом совершенной дизъюнктивной нормальной формы алгебры логики. Нетрудно также показать, что введенный набор элементарных функций несократим, т. е. что ни одну из этих функций нельзя исключить из набора без потери им свойства полноты.

Рассмотрим в качестве примера применения метода нуля-органа в лингвистике задачу математического описания процессов грамматической обработки отдельных слов. Предположим, что испытуемому предъявлены для анализа некоторое слово  $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ , форма слова  $y = (y_1, y_2, \dots, y_q)$  и набор грамматических признаков  $z = (z_1, z_2, \dots, z_r)$ . Буквой  $p$  обозначена максимальная длина слова, буквой  $q$  — максимальная длина формы слова, буквой  $r$  — максимальное число используемых грамматических признаков. Значениями переменных  $x_i, y_j, z_k$  ( $1 \leq i \leq p, 1 \leq j \leq q, 1 \leq k \leq r$ ) служат знаки алфавита  $A$ , составленного из русских букв и знака пробела  $\square$ . Для представления слова используется его словарная форма. Если какая-то из переменных  $x_i, y_j, z_k$  имеет значение  $\square$ , то это означает, что соответствующая буква в слове или форме слова отсутствует, или что отсутствует соответствующий грамматический признак.

Пусть, к примеру,  $z_1$  означает падеж, принимающий шесть значений:  $u$  — именительный,  $p$  — родительный,  $d$  — дательный,  $v$  — винительный,  $t$  — творительный,  $n$  — предложный;  $z_2$  означает род, принимающий три значения:  $m$  — мужской,  $ж$  — женский,  $c$  — средний;  $z_3$  означает число с двумя значениями:  $e$  — единственное,  $м$  — множественное. Пусть  $p = 6, q = 8, r = 3$ . Предположим, что испытуемому предъявлено слово  $x = (\square, \square, c, t, o, л)$ , форма слова  $y = (\square, \square, c, t, o, л, o, м)$ , набор грамматических признаков  $z = (t, м, e)$ . Перед испытуемым ставится задача установить, согласуются между собой или нет заданные слово, форма слова и грамматические признаки. В данном случае предъявленный материал согласуется, поскольку форма *столом* есть форма слова *стол* и имеет творительный падеж, мужской род, единственное число. В случае согласования предъявленных испытуемому данных требуется, чтобы он отреагировал на них положительным ответом 1, а в случае же несогласования —

отрицательным ответом 0. В данном случае испытуемый должен отреагировать ответом 1. Но если бы было предъявлено слово *стул* при прежних значениях формы слова и его признаков, то испытуемый обнаружил бы, что форма слова соотнесена не с тем словом, которое ей на самом деле соответствует, и вынужден был бы сформировать ответ 0. То же самое он должен был бы сделать, если бы была предъявлена форма *столом* в сочетании со значением признака  $z_1$  «родительный падеж».

Таким образом, испытуемый своим поведением реализует некоторую функцию

$$t = L(x, y, z) = L(x_1, x_2, \dots, x_p, y_1, y_2, \dots, y_q, z_1, z_2, \dots, z_r), \quad (3)$$

которую мы назовем *морфологической функцией*. Это название обусловлено тем, что функция  $L$  вводит отношение, изучаемое в разделе грамматики, называемом морфологией языка.

Важно заметить, что испытуемый своим поведением доказывает, что он способен не только отыскивать значение  $t$  морфологической функции, но и в ряде случаев решать уравнение

$$L(x, y, z) = 1, \quad (4)$$

если какая-либо из переменных  $x, y, z$  или их компонентов  $x_i, y_j, z_k$ , или комбинация некоторых из них окажется неизвестной. Уравнение (4) назовем *морфологическим уравнением*, оно выражает требование, чтобы слово, форма слова и грамматические признаки были согласованы между собой.

Пусть, к примеру, значение переменной  $y$  есть форма *столом*, а  $x$  и  $z$  неизвестны. Испытуемый легко находит согласованные с этой формой слово *стол* и набор грамматических значений «творительный падеж», «мужской род», «единственное число». Если же задано слово *степь* и грамматические признаки «дательный падеж» и «множественное число», то испытуемый отыщет согласованную с этими данными форму слова *степеням*.

Таким образом, возникает задача не только математического описания морфологической функции, но и задача разработки методов решения морфологического уравнения, поскольку без такого решения моделирование языковых явлений было бы неполным.

Поступила 23 марта 1977 г.

УДК 62—501.72

И. Г. БИДЕР, И. А. БОЛЬШАКОВ, д-р техн. наук

## О СООТНОШЕНИИ МЕЖДУ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ И ФИЛЬТРАЦИЕЙ В ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ

1. Введение. В свете современных лингвистических теорий язык считается двусторонним преобразователем «Смысл ↔ Текст» (СТ-преобразователь) [1, с. 9]. Он вычисляет синтези-

кеновую функцию, ставящую в соответствие каждому смыслу множество выражающих его текстов, и обратную ей анализирующую функцию, ставящую каждому тексту множество выражаемых им смыслов.

Проблему теоретического и технического моделирования СТ-преобразователя, т. е. языковой компетенции человека, начиная с Хомского [2, с. 126], обычно отделяют от проблемы обучения языку, относя обучение человека и машины ко второму эшелону. Но исследование обучения необходимо вести параллельно, поскольку: 1) любая техническая система может вместить в свои таблицы и алгоритмах лишь конечные сведения о языке, которых при практической работе может не хватить, что вынуждает как-то вводить в систему новые данные; 2) исследование обучения помогает создать базовую предшествующую обучению структуру СТ-преобразователя и тем самым построить действующие его фрагменты, легче приспособляемые к различным языкам; 3) на основе подобных исследований можно улучшить методику обучения языку людей.

С позиций обучения немаловажно, что алгоритмы СТ-преобразователя можно разделить на 2 класса: 1) преобразующие, которые ведут вычисления без перебора, включающего постериорную проверку результатов на правильность; 2) фильтрующие, которые осуществляют полный перебор возможных выходных элементов с последующим отсеком недопустимых из них с помощью правил запрета или предпочтения.

Примером фильтрующего алгоритма является выбор суффикса невозвратной формы русского деепричастия совершенного вида, при котором последовательно 1) берутся оба возможных варианта суффиксов *в* и *ши*, 2) проводятся все необходимые среживания на основе, 3) оставляется вариант с суффиксом *в*, если основа оканчивается на гласную (*посмотрев*), и с суффиксом *ши*, если на согласную (*замерзши*). Тем самым, например, для лексемы ВСТАВАТЬ с основой *встан* на усекаемую гласную будет оставлен только правильный суффикс *в* (*встав*).

Любой крупный алгоритм СТ-преобразователя, видимо, должен содержать преобразующие и фильтрующие части с оптимальным соотношением между ними, обеспечивающим минимальное время вычисления при наименьших затратах памяти. Такое соотношение можно достичь различными путями, зависящими от метода обучения (с учителем). Сами эти методы можно также разбить на два класса: 1) преобразующие, при которых указания учителя сразу приводят к преобразующему алгоритму ученика; 2) фильтрующие, при которых учитель указывает лишь частичные запреты, приводя к освоению учеником фильтрующих правил (под учеником следует понимать человека, а также способный обучаться автомат).

В обоих случаях оптимальное соотношение между преобразованием и фильтрацией устанавливается в процессе самостоя-

гельной языковой практики ученика (путем самоорганизации). Если при обучении превалировали методы преобразующего типа, то в «переходном режиме» преобразовательные правила, видимо, частично переходят в фильтровые. И наоборот, при обучении по фильтрующему методу часть фильтровых запретов в конце концов переводится в преобразовательные правила. В чистом виде ни один из указанных методов обучения, видимо, не используется. Человек в большей степени обучается фильтрующим методом, особенно родному языку в детстве. Обучать же машину можно и чисто преобразующим методом.

Ниже приводится попытка формально-математического описания процесса установления оптимального соотношения между преобразующим и фильтрующим компонентами СТ-преобразователя. Даны лингвистические примеры, иллюстрирующие теорию, но не претендующие на исчерпывающий охват языковых фактов. Для прямого подтверждения излагаемой теории необходимы эксперименты с обучающимися машинами и психолингвистические опыты над людьми. Ряд положений можно проверить, построив действующие фрагменты СТ-преобразователя с соответствующими блоками самоорганизации.

2. От преобразования — к фильтрации. Пусть заданы конечные (или счетные) множества  $X$  — с элементами  $x$  и  $Y$  — с элементами  $y$ , и на множестве  $X$  задана вычислимая функция  $F(x)$ , имеющая в качестве значений конечные подмножества из  $Y$  (подмножества  $F(x')$  и  $F(x'')$  при  $x' \neq x''$  в общем случае пересекаются). Содержательно  $X$  и  $Y$  могут, например, состоять из элементов двух соседних языковых уровней (в частности, поверхностно-синтаксического и глубинно-морфологического). При этом  $F(x)$  устанавливает соответствие между данными уровнями [1, с. 78], и тогда  $E(x)$  есть сама лексическая функция.

Пусть имеется преобразующий алгоритм, вычисляющий функцию  $F(x)$ , т. е. существует такое описание  $S_F$  функции  $F(x)$  и такой набор инструкций  $A_F$ , с помощью которого по  $S_F$  можно вычислить  $F(x)$  для любого  $x \in X$  без проведения перебора. Беспереборность подразумевает, что после применения некоторого правила  $S_F$  к исходному или промежуточному объекту полученный результат не может быть более отбракован из-за невыполнения каких-либо специальных условий на этот результат, из-за невозможности применить другое правило или по иным причинам. Поиск же в  $S_F$  очередного применимого правила допустим.

Пусть эффективность такого алгоритма низка, т. е. объем памяти  $V_F$ , занимаемый  $S_F$  и  $A_F$ , и (или) среднее время вычисления  $T_F$  велики. Попробуем уменьшить  $V_F$  и (или)  $T_F$ . Введем два блока (рис. 1): 1) генератор  $G$ , который исходному  $x$  сопоставляет множество элементов  $y$ , включающее кроме элементов  $y \in F(x)$  и элементы  $y \notin F(x)$ ; 2) фильтр  $\Phi$ , который исходя из  $x$  отсеивает из порожденной совокупности элементы  $y \notin F(x)$ . Если эф-

фективность нового алгоритма выше, чем у исходного, разумно вычислять  $F(x)$  по схеме рис. 1. В целях упрощения генератор должен использовать лишь часть информации, заключенной в  $x$ , остальную же часть должен использовать фильтр. Расчленение  $x$  на два компонента  $x^{(1)}$  и  $x^{(2)}$  осуществимо блоком  $\Delta$  (дискриминатор), введение которого приводит к схеме рис. 2. Поскольку на блок  $\Gamma$  теперь поступает лишь  $x^{(2)}$ , то он генерирует не окончательные  $y \in Y$ , а промежуточные элементы  $y^{(2)}$ , переводимые блоком  $\Phi$  в элементы из  $Y$  с помощью компонента  $x^{(1)}$ .

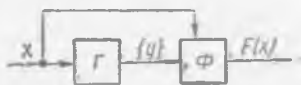


Рис. 1. Схема вычисления  $F(x)$ .

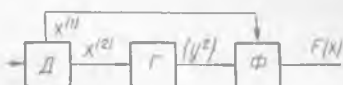


Рис. 2. Схема вычисления  $F(x)$  с дискриминатором.

Формализуем введенные выше понятия. Введем (рис. 3) три дополнительных конечных (или счетных) множества  $X_1$ ,  $X_2$  и  $Y_2$  с элементами  $x^{(1)}$ ,  $x^{(2)}$  и  $y^{(2)}$  соответственно. На этих множествах зададим 5 функций: 1)  $\varphi_1(x)$ , отображающую  $X$  на  $X_1$ ; 2)  $\varphi_2(x)$ , отображающую  $X$  на  $X_2$ ; 3)  $f(x^{(2)})$ ,  $x^{(2)} \in X_2$ , имеющую в качестве значений конечные подмножества  $Y_2$  (множества  $f(x_i^{(2)})$  и  $f(x_j^{(2)})$  при  $x_i^{(2)} \neq x_j^{(2)}$  в общем случае пересекаются); 4)  $\psi(x^{(1)}, y^{(2)})$ ,  $x^{(1)} \in X_1$ ,  $y^{(2)} \in Y_2$ , ставящую в соответствие паре  $(x^{(1)}, y^{(2)})$ , где  $x^{(1)} = \varphi_1(x)$ ,  $y^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$ , элемент  $y \in Y$ ; 5)  $r(x^{(1)}, y^{(2)})$ ,  $x^{(1)} \in X_1$ ,  $y^{(2)} \in Y_2$ , ставящую в соответствие паре  $(x^{(1)}, y^{(2)})$ , где  $x^{(1)} = \varphi_1(x)$ ,  $y^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$ , элемент из  $\{0, 1\}$ . Множества  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_2$  и функции  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $f$ ,  $\psi$ ,  $r$  выберем так, чтобы 1) для любого  $x \in X$  и любых  $y_i^{(2)}, y_j^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$  при  $y_i^{(2)} \neq y_j^{(2)}$  выполнялось  $\psi(\varphi_1(x), y_i^{(2)}) \neq \psi(\varphi_1(x), y_j^{(2)})$ ; 2) для любого  $x \in X$  множество элементов  $y \in Y$ , определяемое условием  $y = \psi(\varphi_1(x), y^{(2)})$ , где  $y^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$ , и обозначаемое  $\psi(\varphi_1(x))$ ,  $f(\varphi_2(x))$ , включало бы множество  $F(x)$ ; 3) для любого  $x \in X$  и любого  $y^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$ , соотношение  $r(\varphi_1(x), y^{(2)}) = 1$  выполнялось тогда и только тогда, когда  $\psi(\varphi_1(x), y^{(2)}) \in F(x)$ .

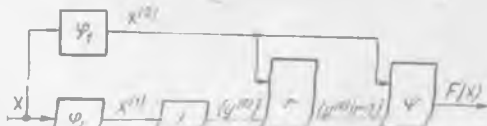


Рис. 3. Схема фильтрового алгоритма.

Пусть функции  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $f$ ,  $\psi$  и  $r$  выбраны так, что для их определения можно построить преобразующие алгоритмы. Тогда  $F(x)$  можно вычислить следующим образом (см. рис. 3): 1) к исходному  $x$  применяются преобразования  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ; 2) к полученному в п. 1 элементу  $x^{(2)}$  применяется преобразование  $f$ ; 3) для всех пар  $(x^{(1)}, y^{(2)})$ , где  $x^{(1)}$  получен в п. 1, а все  $y^{(2)}$  — в п. 2,

вычисляется функция  $r$ ; 4) для всех пар  $(x^{(1)}, y^{(2)})$ , у которых  $r(x^{(1)}, y^{(2)}) = 1$ , находится функция  $\psi$ , что и завершает определение  $F$ . Такой метод вычисления назовем фильтровым алгоритмом. Если измерять степень использования фильтров по некоей шкале (рис. 4), то на ее полюсах окажутся преобразующий и фильтрующий алгоритмы, а внутри — фильтровые.

Функции  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  реализуют дискриминатор  $D$  схемы рис. 2. Компонент  $x^{(1)}$  служит далее для отсева, а компонент  $x^{(2)}$  — для генерации сопоставляемых вариантов. Заметим, что у разных  $x_i$  и  $x_j$  компоненты  $x^{(1)}$  и (или)  $x^{(2)}$  могут совпадать. Функция  $f$  реализует генератор  $G$  и описывает некоторое расширенное по сравнению с  $F(x)$  преобразование объектов  $x^{(2)}$ , близких по структуре к объектам  $x$ , в объекты  $y^{(2)}$ , структурно близкие к  $y$  (иногда

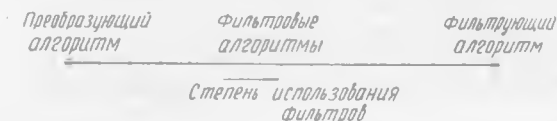


Рис. 4. Классификация алгоритмов по степени использования ими фильтров.

допустимо взять  $Y_2 = Y$ ). Функция  $\psi$  осуществляет заключительное преобразование элементов  $y^{(2)} \in Y_2$  в элементы  $y \in Y$  с учетом компонента  $x^{(1)} = \varphi_1(x)$ , не участвовавшего в преобразовании  $f$ . Без пороговой функции  $r$  последовательное применение преобразований  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $f$  и  $\psi$  дало бы такое подмножество, в которое вошли бы и элементы  $y \notin F(x)$ , поэтому функция  $f$  и названа расширением функции  $F$ . Функция  $r$  отсеивает эти элементы и совместно с  $\psi$  реализует фильтр схемы рис. 2.

- Как пример фильтрового алгоритма рассмотрим алгоритм синтаксического анализа. На вход его поступает цепочка глубинно-морфологических представлений словоформ в виде пар  $(\lambda, \chi)$ , где  $\lambda$  — номер лексемы,  $\chi$  — морфологическая характеристика. Преобразование  $\varphi_2(x)$  заключается в замене номеров лексем на коды их синтаксических классов  $s$ , а преобразование  $\varphi_1(x)$  сводится к опущению морфологической характеристики. Функция  $f$  осуществляет построение всех допустимых деревьев зависимостей с вершинами в виде полученных ранее пар  $(s, \chi)$ . При этом сведения о линейном порядке этих пар в исходной цепочке сохраняются. Функция  $\psi$  осуществляет обратную замену символов  $s$  на  $\lambda$ , после чего сведения о линейном порядке опускаются. Фильтр  $r$  можно, например, задать в виде требования насыщенности сильных валентностей всех входящих в дерево лексем [3, с. 75].

Как правило, функции  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $\psi$  довольно просты и не требуют больших затрат памяти и времени для вычисления. Основная трудность преобразований по схеме рис. 3 состоит в определении функций  $f$  и  $r$ , которые и поглощают практически все

конкретные лингвистические данные, необходимые для преобразования  $x$  в  $y$ . Использовать фильтровой алгоритм разумно, когда объем  $V_f + V_r$  памяти для описания функций  $f$  и  $r$  и (или) среднее время их вычисления  $T_f + T_r$  (сюда, естественно, включается время вычисления для отсеиваемых вариантов) существенно ниже исходных  $V_F$  и (или)  $T_F$ . Между параметрами  $V_f$  и  $T_f$ , с одной стороны, и  $V_r$  и  $T_r$  — с другой существует обратная зависимость: со снижением  $V_f$  и  $T_f$  увеличиваются  $V_r$  и  $T_r$ . Поэтому при распределении лингвистических данных между  $f$  и  $r$  необходим компромисс между сложностью этих функций. В предельном случае функция  $f$  может стать такой, что  $\psi(\varphi_1(x), f(\varphi_2(x))) = Y$  для любого  $x$ , и тогда алгоритм превратится в чисто фильтрующий (см. п. 4).

Причины, по которым в процессе обучения создается преобразующий алгоритм, а затем производится переход к фильтровому, могут быть различными. В частности, при обучении синтезу текста возможно несовпадение статистических распределений разных по сложности случаев синтеза в материале обучения и в последующей языковой практике. Если при обучении все случаи равночастотны, то преобразующий алгоритм на таком материале может быть эффективнее. Если же в дальнейшем сложные случаи будут встречаться редко, то для сохранения эффективности естественно преобразовать алгоритм так, чтобы только в простых случаях синтез проходил без прибора. Соответствующий пример дан в следующем разделе.

Приведенная идея перехода от преобразующего алгоритма к фильтровому упрощена в следующих моментах: 1) для многих языковых уровней построить чисто преобразующий алгоритм практически невозможно и правильнее рассматривать переход в алгоритме от меньшего количества фильтров к большему (т. е. продвижение по шкале рис. 4 слева направо); 2) для реальных алгоритмов, в отличие от схемы рис. 3, характерно рассредоточение фильтрации, которая как бы прославляет преобразователи [1, с. 194]. Однако введенные упрощения позволили объяснить сущность перехода к фильтрам. Более сложные случаи могут включать также вложения фильтровых алгоритмов друг в друга.

3. Порядок актантов в именной группе. Опираясь на [1, с. 276], рассмотрим функцию  $F(x)$ , линейно упорядочивающую актанты в группе отглагольного существительного. Аргументом  $F(x)$  является вектор  $x = (S; D_1, D_2, D_3, D_4)$ , где  $S$  = русская словоформа, являющаяся отглагольным существительным в именительном падеже единственного числа, а  $D_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ , — цепочка русских словоформ, являющаяся  $i$ -м актантом существительного  $S$  ( $D_1$  соответствует  $D_{\text{аг}}$  из [1, с. 176]). Некоторые  $D_i$  могут отсутствовать, что обозначается символом  $\emptyset$ . Для простоты рассмотрим случай, какой-либо  $D_i = S_{\text{род}}$  (агентивное существительное стоит в родительном падеже), либо хотя бы один из актантов  $D_3$  или  $D_4$  не пуст. Один из актантов

может быть отмечен символом  $\perp$  (практически означающим, что  $D_i$  содержит одно из слов *этой, указанный, данный* и т. п.) или ремы  $\Upsilon$  (означающим логическое выделение  $D_i$ ). Значением  $F(x)$  является линейная последовательность словоформ вида  $S \sqcup D_{i_1} \sqcup D_{i_2} \sqcup D_{i_3} \sqcup D_{i_4}$ , где  $\sqcup$  — символ пробела,  $(i_1, i_2, i_3, i_4)$  — некоторая перестановка цифр (1, 2, 3, 4). Например, если  $x = (\text{поставка}; \emptyset; \text{нового оборудования}; \text{заводу}; \emptyset)$ , то  $F(x) = \text{поставка заводу нового оборудования}$ .

Пусть первоначально для вычисления  $F(x)$  был выбран следующий преобразующий алгоритм.

1°. Если в  $x$  есть актанта, отмеченный как  $\Upsilon$ , то он ставится крайним справа. Например,  $x = (\text{поставка}; \Upsilon \text{ самим заводом}; \text{нового оборудования}; \text{всем предприятиям}; \emptyset)$  ведет к  $F(x) = \text{поставка нового оборудования всем предприятиям самим заводом}$ .

2°. Устанавливается отношение порядка для актанта в парах  $D_i, D_j, i, j = 1, \dots, 4$ :

2°а. Если количество  $l_i$  словоформ в  $D_i$  превышает количество  $l_j$  словоформ в  $D_j$  не менее, чем вдвое ( $l_i/l_j \geq 2$ ), то принимается порядок  $D_j D_i$  (в  $l_i$  и  $l_j$  безударные и неслоговые словоформы типа *не, для, в, с* и т. п. не учитываются). Например,  $x = (\text{поставка}; \emptyset; \text{нового оборудования}; \text{заводу}; \emptyset)$  ведет к  $F(x) = \text{поставка заводу нового оборудования}$ .

2°б. При  $0,5 < l_i/l_j \leq 1,3, i < j$ , принимается порядок  $D_i D_j$ . Например,  $x = (\text{поставка}; \emptyset; \text{оборудования}; \text{заводу}; \emptyset)$  ведет к  $F(x) = \text{поставка оборудования заводу}$ .

2°в. Если  $1,3 < l_i/l_j < 2, i < j, i \neq 1$  и  $D_i$  не отмечен  $\perp$ , то принимается порядок  $D_i D_j$ . Например,  $x = (\text{поставка}; \emptyset; \text{нового автоматизированного оборудования}; \text{Новочеркасскому заводу}; \emptyset)$  ведет к  $F(x) = \text{поставка нового автоматизированного оборудования Новочеркасскому заводу}$ . Если при тех же условиях  $D_i$  отмечен  $\perp$  или (и)  $i = 1$ , то принимается порядок  $D_j D_i$ . Например,  $x = (\text{поставка}; \emptyset; \text{нового автоматизированного оборудования}; \perp \text{ этому заводу}; \emptyset)$  ведет к  $F(x) = \text{поставка этому заводу нового автоматизированного оборудования}$ .

3°. Исходя из установленного в п. 2° порядка в парах  $D_i D_j$  и результата п. 1°, устанавливается линейный порядок следования всех актанта.

Однако в речевой практике одни случаи расположения актанта встречаются много чаще других и возникает потребность перейти от приведенного алгоритма к фильтровому. Так, если при  $0,5 < l_i/l_j < 2, i < j$ , согласно алгоритму чаще всего выбирается порядок  $D_i D_j$ , то правила 2°б, 2°в лучше заменить генератором: 2°б' — при  $0,5 < l_i/l_j < 2, i < j$ , допустимы оба варианта  $D_i D_j$  и  $D_j D_i$ . Это даст выигрыш в среднем времени вычисления  $F(x)$ , поскольку: 1) для дальнейшей фильтрации нужно рассматривать не все пары  $D_i D_j$ , а лишь те, которые составлены из рядом стоящих актанта, что сокращает число вариантов при 4 актантах вдвое; 2) при использовании шага 2°б' можно сначала вы-

рать вариант  $D_i D_j$  и лишь при его отсеве фильтром пытаться применить вариант  $D_j D_i$ . Модернизированный алгоритм будет еще всего вычислять  $F(x)$  без перебора.

Если же на вход алгоритма обычно подаются списки актантов, приблизительно равные по длине, то правило 2° имеет смысл целиком перевести в фильтр. Тогда при преобразовании будут генерироваться все возможные расстановки актантов, в которых актант со знаком  $\uparrow$  стоит крайним справа, причем первой будет выдаваться расстановка, соответствующая возрастанию сходных номеров актантов. Поскольку чаще всего она и будет пропущена фильтром, среднее время вычисления функции  $F(x)$  сократится.

Следует отметить, что алгоритм линейного упорядочения, учитывающий все необходимые тонкости, построить без фильтров невозможно, так как на него влияет фактор ложного стыка [1, с. 276], а диагностировать последний можно лишь после некоторой первоначальной расстановки. В фильтре же этот фактор учесть несложно.

4. От фильтрации к преобразованию. Пусть, как в п. 2, имеются множества  $X$  и  $Y$  и функция  $F(x)$ . Введем функцию  $R(x, y)$ , отображающую  $X \times Y$  на множество  $\{0, 1\}$  обладающую тем свойством, что  $R(x, y) = 1$  тогда и только тогда, когда  $y \in F(x)$ . Пусть имеется преобразующий алгоритм, вычисляющий функцию  $R(x, y)$ ; тогда функцию  $F(x)$  можно вычислять, определяя для всех  $y \in Y$  функцию  $R(x, y)$ . Но такой фильтрующий алгоритм при большой мощности  $Y$  потребует больших затрат времени.

Для их снижения введем множества  $X_1, X_2, Y_2$  и функции  $\varphi_1, \varphi_2, f, \psi$  и  $r$ , действующие на тех же множествах, что и в п. 2. Эти множества и функции выберем так, чтобы 1) для любого  $x \in X$  и любых  $y_i^{(2)}, y_j^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$  при  $y_i^{(2)} \neq y_j^{(2)}$  выполнялось  $\psi(\varphi_1(x), y_i^{(2)}) \neq \psi(\varphi_1(x), y_j^{(2)})$ ; 2) для любого  $x \in X$  множество элементов  $y = \psi(\varphi_1(x), y^{(2)})$ , где  $y^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$ , включало в себя множество  $y$ , определяемое условием  $R(x, y) = 1$ ; 3) для любого  $x \in X$  и любого  $y^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$   $r(\varphi_1(x), y^{(2)}) = 1$  тогда и только тогда, когда  $R(x, \psi(\varphi_1(x), y^{(2)})) = 1$ .

Введенные требования к функциям  $\varphi_1, \varphi_2, f, \psi$  и  $r$  эквивалентны требованиям из п. 2. Поэтому с помощью данных функций можно вычислять  $F(x)$  по схеме рис. 3, и это повысит эффективность алгоритма. Содержательно функции  $f$  и  $r$  несколько отличны от таковых в п. 2. Функция  $f$  служит для сужения области фильтрации, т. е. для уменьшения числа перебираемых вариантов (по сравнению с мощностью  $Y$ ), а функция  $r(x^{(1)}, y^{(2)})$  представляет собой суженный (относительно  $R(x, y)$ ) фильтр. Однако и здесь применимы все рассуждения п. 2 об оптимальном распределении лингвистических данных между функциями  $f$  и  $r$ . В предельном случае функция  $r(x^{(1)}, y^{(2)})$  тождественно равна единице и алгоритм является чисто преобразующим.

Причины, по которым в «языковом процессоре» человека происходит переход от фильтрующего алгоритма к фильтровому и даже к преобразующему, могут быть связаны с постепенностью овладения языком. Покажем предположительный характер такого перехода на примере.

Рассмотрим обучение лексической функции  $Ver(x)$  [1, с. 90]. Пусть  $X = \{\text{догадка, шутка, подозрение, приговор, гордость}\}$ , а  $Y = \{\text{правильный, уместный, обоснованный, справедливый, законный}\}$ . Тогда функция  $F(x)$  определится равенствами:  $Ver(\text{догадка}) = \text{правильный}$ ,  $Ver(\text{шутка}) = \text{уместный}$ ,  $Ver(\text{подозрение}) = \text{обоснованный}$ ,  $Ver(\text{приговор}) = \text{справедливый}$ ,  $Ver(\text{гордость}) = \text{законный}$ .

В процессе обучения ученик сначала запоминает, что смысл «правильный» для различных лексем из  $X$  можно выразить лексемами из  $Y$ , причем все  $y \in Y$  полностью синонимичны, т. е. могут сочетаться со всеми  $x \in X$ . Он начинает выдавать различные сочетания элементов  $x$  и  $y$ , в том числе и неверные (типа *справедливая догадка, правильная гордость*). Учитель оценивает правильность сочетаний, на основе чего в памяти ученика строится фильтрующая функция  $R_{xy}$  в виде матрицы, элементы которой равны единице при допустимом сочетании  $x, y$ , и нулю — в противном случае. После обучения ученик приступает к самостоятельной речевой практике, при которой ему приходится часто вычислять  $Ver(x)$  для всех  $x \in X$ . Для снижения времени вычисления  $Ver(x)$  первоначально фильтрующий алгоритм постепенно трансформируется в преобразующий путем занесения значения  $Ver(x)$  непосредственно в словарные статьи всех лексем  $x \in X$ .

**5. Заключение.** При воплощении не обучающейся и не самоорганизующейся модели СТ-преобразователя разработчик должен сам обеспечить удовлетворительное соотношение между преобразованием и фильтрацией (в указанном их понимании). Самоорганизующаяся модель должна обладать способностью переходить к оптимальному алгоритму от исходного (фильтрующего либо преобразующего) алгоритма. Обучение языковым преобразованиям, для которых интуитивно оптимальным является фильтрующий, преобразующий или смешанный алгоритм, должно проводиться фильтрующими, преобразующими или смешанными методами соответственно. Обучение можно проводить и иными способами, но скорость совершенствования системы будет тогда существенно меньшей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельчук И. А. Опыт теории лингвистических моделей «Смысл → Текст». М., «Наука», 1974. 314 с.
2. Хомский Н. Формальные свойства грамматики. Кибернетический сборник: Новая серия, № 2. М., «Мир», 1969. 126 с.
3. Ловицкий Е. Е. Исчисление синтаксических структур и автоматический анализ текста. — В сб.: Международный семинар по машинному переводу (М., 25—27 ноября 1975 г.). Тезисы докладов и сообщений. Изд. ВЦП, М., 1975, с. 75—78.

Поступила 28 февраля 1977 г.

## БАЙЕСОВСКИЙ ПОДХОД К ФИЛЬТРОВОМУ МЕТОДУ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТЕКСТОВ

1. Введение. В лингвистических теориях и в алгоритмах автоматической обработки текстов на естественных языках, особенно на синтаксическом уровне, применяется так называемый фильтровой метод анализа и синтеза текстов. Его сущность заключается в том, что преобразование некоторого языкового объекта  $x$  производится в два этапа. Сначала находится расширенное множество потенциальных вариантов преобразования этого объекта, «лишние» элементы которого затем отсеиваются с помощью правил запрета, справедливых только для объекта  $x$  или для узкого охватывающего класса. Эти правила и называются лингвистическими фильтрами.

В свете новейших исследований [1, 2, с. 194—199], по крайней мере, часть фильтров должна работать не по жесткому пороговому принципу допустимо — запрещено, а по «мягкому» принципу лучше — хуже (метод предпочтения). При использовании последнего каждому варианту преобразования присваивается некоторая числовая оценка (вес) и окончательно выбирается вариант, обеспечивающий экстремум оценки.

Существует несколько вариантов оценивания. Так, в синтаксическом анализаторе [1] вес результирующего дерева вычисляется по ходу его построения и окончательным считается вариант с максимальным весом. В алгоритме выбора порядка слов в предложении [2, с. 268—302] кроме веса расстановки учитывается наличие «нежелательных явлений» в каждом из вариантов. Такие явления характеризуются отрицательной числовой оценкой «штраф», и среди вариантов, имеющих вес расстановки не ниже некоторого порога, отбирается тот, который имеет минимальную сумму штрафов.

Используемые в настоящее время методы присваивания вариантам оценок не опираются на какую-либо строгую математическую модель. По нашему мнению, «мягкие» фильтры характеризуют вероятностные механизмы языка, поэтому для их описания можно использовать байесовское решающее правило, широко применяемое в различных научно-технических областях [3, с. 9—18]. Анализ текстов с позиций байесовской теории решений предложен, видимо, впервые в работе [4], хотя развитая в ней модель и не пригодна для полного описания естественного языка, трактовка языковых преобразований с байесовских позиций представляется очень плодотворной.

Цель данной статьи — разработка отличного от предложенного в [4] байесовского подхода к языковым преобразованиям и связанным с ними фильтровым операциям. Представляется,

что описываемый ниже подход в какой-то степени отображает процессы, происходящие в мозгу носителя языка. Мы опираемся ниже на детерминистское определение фильтрового метода, приведенного в работе [5], используем принятую в ней систему обозначений и разобранный там пример.

2. Сущность метода предпочтения. Метод предпочтения в отличие от детерминистской схемы (см. рис. 3 из [5]) использует иной механизм фильтрации: каждому элементу  $y \in \psi(\varphi_1(x), f(\varphi_2(x)))$  присваивается некоторая числовая оценка  $l(x, y) > 0$ , характеризующая степень «правильности»  $y$  относительно  $x$ . При этом считается  $l(x, y) = 0$  для  $y \in \psi(\varphi_1(x), f(\varphi_2(x)))$ . Выходом алгоритма, использующего метод предпочтения,

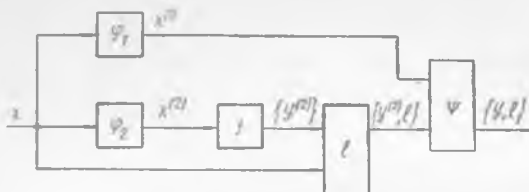


Рис. 1. Схема алгоритма предпочтения.

является множество вариантов  $y$ , снабженных оценками  $l$ . Для сведения такого алгоритма к детерминистской схеме необходимо по имеющимся оценкам  $l(x, y)$  выбрать порог  $R_0(x) > 0$  и отсеять затем элементы  $y$ , для которых  $l(x, y) < R_0(x)$ . При этом функции  $l(x, y)$  и  $R_0(x)$  необходимо выбрать так, чтобы для любых  $x \in X$  и  $y \in \psi(\varphi_1(x), f(\varphi_2(x)))$  выполнялось  $l(x, y) \geq R_0(x)$  тогда и только тогда, когда  $y \in F(x)$ .

Выбор функции  $R_0(x)$  является относительно самостоятельной задачей, к которой может быть несколько подходов. В частности, допустимо взять  $R_0(x) = \max l(x, y)$

$$y \in \psi(\varphi_1(x), f(\varphi_2(x)))$$

Альтернативой может служить  $R_0(x) = \sum l(x, y)/n(x)$ ,

$$y \in \psi(\varphi_1(x), f(\varphi_2(x))),$$

где  $n(x)$  — мощность множества  $\psi(\varphi_1(x), f(\varphi_2(x)))$ .

Согласно условиям, которым должны удовлетворять функции  $\varphi_1, \varphi_2, \psi, f$  [5], любой  $y \in \psi(\varphi_1(x), f(\varphi_2(x)))$  получается из некоторого (единственного)  $y^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$ . Поэтому функцию  $l$  можно ввести относительно пары  $(x, y^{(2)})$ . Тогда процесс вычислений по методу предпочтения принимает вид рис. 1. В отличие от функции  $r$  из [5], функция  $l$  здесь зависит не от  $x^{(1)}$ , а от всего  $x$ . Данное явление объясняется тем, что для разных  $x_i, x_j \in X (x_i \neq x_j)$ , у которых  $\varphi_1(x_i) = \varphi_1(x_j)$  и  $f(\varphi_2(x_i)) \cap f(\varphi_2(x_j)) \neq \emptyset$  и одного и того же  $y \in f(\varphi_2(x_i)) \cap f(\varphi_2(x_j))$  оценки  $l(x_i, y^{(2)})$  и  $l(x_j, y^{(2)})$  могут в общем случае быть разными, что не требуется учи-

тывать при детерминистском варианте, для которого в таких случаях  $\psi(\varphi_1(x_i), y^{(2)}) \in F(x_i)$  и  $\psi(\varphi_1(x_j), y^{(2)}) \in F(x_j)$ .

Если же потребовать легко выполнимого условия, чтобы для любых  $x_i^{(2)}, x_j^{(2)} \in X_2$ , где  $x_i^{(2)} \neq x_j^{(2)}$ , выполнялось  $f(x_i^{(2)}) \cap f(x_j^{(2)}) = \emptyset$ , то функция  $l$  станет зависимой только от пары  $(x^{(1)}, y^{(2)})$ .

Рассмотрим свойства, которым должна удовлетворять функция  $l$ . Пусть  $X(x^{(2)})$  есть подмножество  $X$ , для элементов которого  $\varphi_2(x) = x^{(2)}$  (т. е.  $X(x^{(2)})$  есть множество прообразов  $x^{(2)}$  относительно функции  $\varphi_2$ ). Если для фиксированного  $x^{(2)}$  перебирать различные  $y^{(2)} \in f(x^{(2)})$ , то для одних  $y^{(2)}$  обнаруживается достаточно много элементов  $x \in X(x^{(2)})$ , удовлетворяющих условию  $\psi(\varphi_1(x), y^{(2)}) \in F(x)$ , а для других  $y^{(2)}$  таких элементов мало. Чтобы количественно оценить это явление, введем некоторую функцию  $N(x^{(2)}, y^{(2)})$ , монотонно возрастающую с ростом числа элементов  $x \in X(x^{(2)})$ , для которых  $\psi(\varphi_1(x), y^{(2)}) \in F(x)$ , и характеризующую «нормативность» преобразования  $x^{(2)}$  в  $y^{(2)}$ , т. е. некоторое общее свойство элементов  $x \in X(x^{(2)})$  (в какой-то степени  $N(x^{(2)}, y^{(2)})$  соответствует весу расстановки из [2, с. 279]).

Для отображения индивидуальных свойств элемента  $x$  введем функцию  $l(x, y^{(2)})$ , которая показывает, насколько конкретный  $y^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$  соответствует  $x$  по компоненте  $x^{(1)}$ , не использованной в преобразовании  $f$ , и убывает с ростом несоответствия между этими элементами ( $l(x, y^{(2)})$  в какой-то степени отображает суммарный штраф из [2, с. 286]). Естественно потребовать, чтобы функция  $l$  возрастала как с ростом  $N$ , так и с ростом  $l$ , что легко обеспечить, положив  $l(x, y^{(2)}) = N(\varphi_2(x), y^{(2)}) l(x, y^{(2)})$ . Как будет показано, такой вид функции  $l$  и получается при использовании байесовского правила.

3. Байесовский метод. Пусть заданы два счетно-бесконечных (или конечных) множества:  $Q$  с элементами  $q$  и  $T$  с элементами  $t$ . Элементы множеств  $Q$  и  $T$  вероятностно связаны и имеется алгоритм вычисления условных вероятностей  $p(t|q)$ ;  $t \in T$ ,  $q \in Q$  появления элемента  $t \in T$  при наблюдении  $q \in Q$ . Наблюдению доступны лишь элементы множества  $Q$ , а задача решающего правила состоит в том, чтобы для каждого  $q \in Q$  наилучшим (в некотором смысле) образом определить, какой из связанных элементов  $t \in T$  имел место. Частный случай байесовского правила считает искомым элемент  $t$ , для которого вероятность  $p(t|q)$  максимальна [3, с. 17].

Ситуации, обычно описываемые при помощи мягких фильтров, несут явно выраженный вероятностный характер. Для их моделирования удобно использовать недетерминированный алгоритм, на вход которого подается элемент  $x$ , а выходом является один из элементов  $y \in \psi(\varphi_1(x), f(\varphi_2(x)))$ , выбираемый в соответствии со встроенным случайным механизмом. Этот механизм можно описать, задав условную вероятность  $p(y|x)$  появления на выходе алгоритма элемента  $y$ , если на вход подан  $x$ . При этом для элементов  $y \in \psi(\varphi_1(x), f(\varphi_2(x)))$  выполняется  $p(x|y) = 0$ .

Представляется, что человек использует некоторый механизм внутренних оценок вероятности  $p(x|y)$ , стараясь выбирать варианты с высокими ее значениями, т. е. действует в соответствии с описанным выше правилом. Поэтому в правильно построенном алгоритме функция  $l$  должна монотонно возрастать с ростом  $p(y|x)$ ; проще всего здесь взять пропорциональной  $p(y|x)$ .

Для практического использования байесовского правила необходимо уметь вычислять функцию  $p(y|x)$ . Пусть преобразование  $x$  в  $y$  производится недетерминированным алгоритмом с помощью промежуточных элементов  $x^{(1)}$ ,  $x^{(2)}$ ,  $y^{(2)}$ . Тогда  $p(y|x)$  можно представить в виде  $p(y^{(2)}|x^{(2)})p(x^{(1)}|y^{(2)}, x^{(2)})p(x^{(1)}|x)$ .

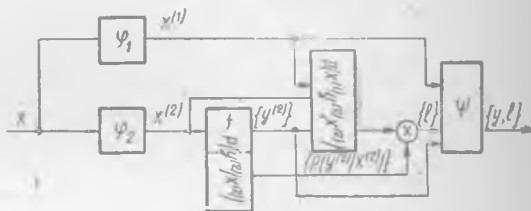


Рис. 2. Схема алгоритма, использующего байесовское решающее правило.

где  $p(y^{(2)}|x^{(2)})$  — вероятность преобразования  $x^{(2)}$  в  $y^{(2)}$ ;  $p(x^{(1)}|y^{(2)}, x^{(2)})$  — вероятность того, что при проведении преобразования  $x^{(2)}$  в  $y^{(2)}$  на вход алгоритма был подан  $x$ , для которого  $\varphi_1(x) = x^{(1)}$ ;  $p(x^{(1)}|x^{(2)})$  — вероятность того, что для входного  $x$   $\varphi_1(x) = x^{(1)}$  при  $\varphi_2(x) = x^{(2)}$ . Поскольку все варианты  $y^{(2)}$  рассматриваются алгоритмом относительно одного входного элемента  $x$ , то  $p(x^{(1)}|x^{(2)}) = \text{const}$  и функцию  $l$  можно представить в виде

$$l(x, y^{(2)}) = p(y^{(2)}|\varphi_2(x))p(\varphi_1(x)|y^{(2)}, \varphi_2(x)).$$

Использование уравнения (1) приводит к схеме рис. 2. Вероятности  $p(y^{(2)}|x^{(2)})$  и  $p(x^{(1)}|y^{(2)}, x^{(2)})$  здесь как раз и играют роль введенных в предыдущем разделе функций  $N$  и  $I$ . Заметим, что если  $f(x_i^{(2)}) \cap f(x_j^{(2)}) = \emptyset$  при  $x_i^{(2)} \neq x_j^{(2)}$ , то (1) преобразуется к виду  $l(x^{(1)}, y^{(2)}) = p(y^{(2)})p(\varphi_1(x)|y^{(2)})$  и функция  $l$  становится независимой от  $x^{(2)}$ .

Для выполнения условия  $l(x, y) > 0$  при  $y^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$  (п. 2) необходимо функции  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\psi$ ,  $f$  выбирать так, чтобы для любого  $y^{(2)} \in f(\varphi_2(x))$  выполнялось  $p(y^{(2)}|x^{(2)}) \neq 0$ . Тогда процесс вычисления функции  $f(x^{(2)})$  можно трактовать как процесс деления в  $Y_2$  такого подмножества, для элементов которого  $p(y^{(2)}|x^{(2)}) \neq 0$ . Однако отличие от нуля  $p(y^{(2)}|x^{(2)})$  не исключает того, что при определенных  $x$  вероятность  $p(x^{(1)}|y^{(2)}, x^{(2)})$  практически обращается в нуль, тем самым отсеивая элемент  $y^{(2)}$ .

Рассмотрим теперь способы вычисления  $p(y^{(2)} | x^{(2)})$ . Реально исследования нам представлены тексты, состоящие из предложений с заведомо высокими значениями функции  $l$ , поскольку человек при их составлении уже применял процедуру оценки максимуму  $p(y | x)$ . Поэтому в общем случае точно определить все значения  $p(y^{(2)} | x^{(2)})$  путем статистического анализа текстов невозможно, так как многие из пар  $(x^{(2)}, y^{(2)})$  могут в текстах вообще не встретиться. Но даже если статистический анализ позволил бы определить все значения  $p(y^{(2)} | x^{(2)})$ , то при больших мощностях множеств  $X_2, Y_2$  объем памяти для записи всех значений был бы очень велик, а при бесконечности множеств  $X_2, Y_2$  такой способ вычислений вообще невозможен. Чтобы обойти эти трудности, можно воспользоваться следующей стратегией. Элементы  $x^{(2)}$  и  $y^{(2)}$  представляются в виде векторов  $x^{(2)} = (x_1^2, \dots, x_n^2)$  и  $y^{(2)} = (y_1^2, \dots, y_n^2)$  соответственно так, чтобы с одной стороны, компоненты  $y_i^2, y_j^2$  были статистически независимы при  $i \neq j (i, j = 1, \dots, n)$ , а с другой — компонент  $y_i^2$  вектора  $y^{(2)}$  зависел лишь от компонента  $x_i^2$  вектора  $x^{(2)}$  ( $i = 1, \dots, n$ ). В этом случае

$$p(y^{(2)} | x^{(2)}) = \prod_{i=1}^n p(y_i^2 | x_i^2).$$

Дополнительно выдвигается требование, чтобы для любой пары  $(x^{(2)}, y^{(2)})$ , где  $y^{(2)} \in f(x^{(2)})$ , любая пара  $(x_i^{(2)}, y_i^{(2)})$ ,  $i = 1, \dots, n$ , компонентов векторов  $x^{(2)}$  и  $y^{(2)}$  реально встречалась в текстах. Представляется, что в этом случае значения вероятности  $p(y_i^2 | x_i^2)$ , оцененные путем статистического анализа текстов, близки к истинным (человеческим) ее значениям, поскольку человек при обучении языку, видимо, пользуется аналогичными процедурами анализа текстов. Поэтому, выбрав способ векторного представления  $x^{(2)}$  и  $y^{(2)}$  с конечным и малым числом компонентов и проанализировав представительный корпус текстов, можно сводить вычисления с использованием минимума памяти.

Для примера рассмотрим алгоритм выбора порядка слов, представляющий дерево зависимостей  $x$  (в узлах его стоят глубинно-логические представления (ГМП) лексем, а стрелки помечены символами поверхностно-синтаксических отношений [2, 18—219]) в линейную цепочку его узлов  $y$ . Пусть функция  $\varphi_2$  сводит дерево  $x$  в набор составляющих его кустов  $x^{(2)} = (x_1^2, \dots, x_n^2)$ , в узлах которых вместо символов ГМП лексем — коды синтаксических классов этих лексем, а функция  $f$  осуществляет независимый перевод каждого такого куста  $x_i^2 (i = 1, \dots, n)$  в одну или несколько линейных последовательно расположенных его узлов  $y_i^2$ . Тогда  $y^{(2)} = (y_1^2, \dots, y_n^2)$ . Поскольку преобразование каждого куста  $x_i^2$  производится без обращения к дан-

ным других кустов, мы получаем нужные нам векторы  $x^{(2)}$  и  $y^{(2)}$  в процессе вычислений.

Для вычисления  $p(x^{(1)} | y^{(2)}, x^{(2)})$  можно применить ту же процедуру, что и для вычисления  $p(y^{(2)} | x^{(2)}; x^{(1)}, x^{(2)}, y^{(2)})$  представляются в виде векторов  $x^{(1)} = (x_1^1, \dots, x_n^1)$ ,  $x^{(2)} = (x_1^2, \dots, x_n^2)$ ,  $y^{(2)} = (y_1^2, \dots, y_n^2)$  соответственно так, чтобы  $x_i^1$  и  $x_j^1$  при  $i \neq j$  ( $i, j = 1, \dots, n$ ) были статистически независимыми и компонент  $x_i^1$  ( $i = 1, \dots, n$ ) вектора  $x^{(1)}$  зависел бы лишь от компонент  $x_i^2$  и  $y_i^2$  векторов  $x^{(2)}$  и  $y^{(2)}$  соответственно. Дополнительно выдвигается требование, чтобы для любого  $x \in X$  и любой тройки  $(x^{(1)}, y^{(2)}, x^{(2)})$ , где  $x^{(1)} = \varphi_1(x)$ ,  $x^{(2)} = \varphi_2(x)$ ,  $y^{(2)} \in f(x^{(2)})$ , любая тройка  $(x_i^1, y_i^2, x_i^2)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , компонент векторов  $x^{(1)}$ ,  $y^{(2)}$ ,  $x^{(2)}$  реально встречалась в текстах. Само вычисление проводится по формуле

$$p(x^{(1)} | y^{(2)}, x^{(2)}) = \prod_{i=1}^n p(x_i^1 | y_i^2, x_i^2).$$

4. Порядок актантов в именной группе. Применим развитый подход к задаче установления порядка актантов в именной группе, описанной в [5, с. 8—11]. Пусть функция  $\varphi_1$  переводит входной вектор  $x = (S; D_1; D_2; D_3; D_4)$  в аналогичный вектор  $x^{(1)}$ , но без помет  $\mathfrak{A}$  у актантов. Функция  $\varphi_2$  переводит  $x$  в вектор  $x^{(2)} = (A_1(z_1^1; z_2^1); A_2(z_1^2; z_2^2); \dots; A_k(z_1^k; z_2^k))$ , где  $k$  — количество непустых актантов в  $x$ ; элемент  $A_i$ ,  $i = 1, \dots, k$ , соответствует актанту  $D_{i_t}$ , являющемуся  $i$ -м при пересчете непустых актантов вектора  $x$  слева направо; признак  $z_1^i = \mathfrak{A}$  или  $\bar{\mathfrak{A}}$  характеризует наличие — отсутствие у актанта  $D_{i_t}$  пометы  $\mathfrak{A}$ ;  $z_2^i$  — список (возможно пустой) тех элементов  $A_t$ ,  $t = 1, \dots, k$ , вектора  $x^{(2)}$ , для которых соответствующие им актанты  $D_{i_t}$  вектора  $x$  имеют длину  $l_t$ , не менее чем вдвое превышающую длину  $l_i$  актанта  $D_{i_t}$ . Например, при  $x = (\text{поставка}; \mathfrak{A} \text{ самим заводом}; \text{нового оборудования}; \text{предприятиям}; \emptyset)$ , а  $x^{(2)} = (A_1(\mathfrak{A}; \emptyset); A_2(\bar{\mathfrak{A}}; \emptyset); A_3(\bar{\mathfrak{A}}; A_1, A_2))$ . Функция  $f$  переводит  $x^{(2)}$  в набор допустимых цепочек  $y^{(2)}$  вида  $A_{i_1}(z_1^{i_1}; z_2^{i_1}) \sqcup A_{i_2}(z_1^{i_2}; z_2^{i_2}) \sqcup \dots \sqcup A_{i_k}(z_1^{i_k}; z_2^{i_k})$ , где  $(i_1, \dots, i_k)$  — некоторая перестановка  $(1, \dots, k)$ . А функция  $\psi$  подставляет в  $y^{(2)}$  вместо символов  $A_i$ ,  $i = 1, \dots, k$ , соответствующие актанты  $D_{i_t}$ .

Пусть функция  $f$  генерирует цепочки  $y^{(2)}$  по следующим правилам: 1) компонент  $A_i(z_1^i; z_2^i)$ , у которого  $z_1^i = \mathfrak{A}$ , должен стоять в выходных цепочках  $y^{(2)}$  самым правым; 2) если  $A_i \in z_2^t$  ( $i, t = 1, \dots, k$ ), т. е. длина актанта  $D_{i_t}$  соответствующего  $A_i$  не менее чем вдвое превышает длину актанта  $D_{i_t}$ , соответствующую

щего  $A_i$ , то компонент  $A_i$  должен в выходных цепочках  $y^{(2)}$  стоять правее, чем  $A_j$ ; 3) если  $A_i \in \bar{z}_2^i$  и  $A_j \in z_2^j$ , т. е. длины  $l_i, l_j$  актантов, соответствующих  $A_i, A_j$ , удовлетворяют условию  $0,5 < l_i | l_j < 2$ , то допустимо расположение  $A_i$  как правее, так и левее  $A_j$ . Тогда для  $x = (\text{поставка}; \mathcal{Y} \text{ самим заводом}; \text{нового оборудования}; \perp \text{ этим предприятиям}; \emptyset)$ , у которого  $x^{(1)} = \text{поставка}; \text{самим заводом}; \text{нового оборудования}; \perp \text{ этим предприятиям}; \emptyset$ , а  $x^{(2)} = (A_2(\mathcal{Y}; \emptyset); A_2(\bar{\mathcal{Y}}; \emptyset); A_3(\bar{\mathcal{Y}}; \emptyset))$ , допустимы две цепочки  $y_1^{(2)} = A_2(\bar{\mathcal{Y}}; \emptyset) \sqcup A_3(\bar{\mathcal{Y}}; \emptyset) \sqcup A_1(\mathcal{Y}; \emptyset)$ ;  $y_2^{(2)} = A_3(\bar{\mathcal{Y}}; \emptyset) \sqcup A_2(\bar{\mathcal{Y}}; \emptyset) \sqcup A_1(\mathcal{Y}; \emptyset)$ .

Легко показать, что при таком выборе функций  $\varphi_1, \varphi_2, \psi, f$  вероятность  $p(y^{(2)} | x^{(2)})$  определяется соотношением  $p(y^{(2)} | x^{(2)}) = p_1^m, p_2^l$ . Здесь  $p_1$  — вероятность того, что при наличии в  $x$  двух актантов  $D_i, D_j$ , для которых  $i < j$ ,  $0,5 < l_i | l_j < 2$  и которые не отмечены символом  $\mathcal{Y}$ , актант  $D_i$  стоит левее  $D_j$ ;  $p_2$  — вероятность того, что при тех же условиях  $D_i$  стоит правее  $D_j$ ;  $m$  — количество пар элементов  $A_i(z_1^i, z_2^i), A_j(z_1^j, z_2^j)$  цепочки  $y^{(2)}$ , для которых  $A_i$  стоит в  $y^{(2)}$  непосредственно перед  $A_j$ ,  $z_1^i, z_1^j = \mathcal{Y}$ ,  $A_i \in \bar{z}_2^i, A_j \in z_2^j, i < j$ ;  $l$  — количество пар  $A_i, A_j$  в  $y^{(2)}$ , для которых при тех же условиях  $i < j$ . В частности, для приведенного выше примера  $p(y_1^{(2)} | x^{(2)}) = p_1, p(y_2^{(2)} | x^{(2)}) = p_2$ .

Для тех пар актантов  $D_i, D_j$  из  $x$ , для которых  $i < j$ , причем ни  $D_i$  ни  $D_j$  не отмечены признаком  $\mathcal{Y}$  и  $0,5 < l_i | l_j < 2$  и которые в результирующей цепочке  $y$  стоят рядом, введем переменные  $k, t, s, q, m$ , где  $k = l_i | l_j$ ;  $t$  принимает значение  $\emptyset$ , если ни  $D_i$  ни  $D_j$  не отмечены символом  $\perp$ , значение  $\perp 1$ , если  $D_i$  отмечен символом  $\perp$ , и значение  $\perp 2$ , если  $D_j$  отмечен символом  $\perp$ ;  $s$  принимает значение 1, если  $D_i$  и  $D_j$  в результирующей цепочке  $y$  образуют ложный стык (о понятии ложного стыка см. [2, с. 276]), и значение 0 в противном случае;  $q$  принимает значение 0, если в результирующей цепочке  $D_i$  предшествует  $D_j$ , и значение 1 в противном случае;  $m$  принимает значение 1, если  $i = 1$ , и значение 0 в противном случае. Пусть в цепочке  $y^{(2)}$  имеется  $p$  пар  $a_r (r = 1, \dots, p)$ , составленных из рядом стоящих элементов  $A_i(z_1^i, z_2^i), A_j(z_1^j, z_2^j)$ , для которых

$$z_1^i, z_1^j = \bar{\mathcal{Y}}, A_i \in z_2^i, A_j \in z_2^j.$$

Для каждой такой пары, используя вектор  $x^{(1)}$ , можно легко найти значения  $k_r, t_r, s_r, q_r, m_r$  введенных выше переменных  $k, t, s, q, m$ . Представляется, что наборы значений  $k_r, t_r, s_r, q_r, m_r$  для всех пар  $a_r, r = 1, \dots, p$ , содержат всю информацию, необходимую для вычисления функции  $p(x^{(1)} | y^{(2)}, x^{(2)})$ . При этом наборы, соответствующие разным парам  $a_i, a_j (i \neq j)$ , являются статистически независимыми, а само значение вероятности  $p(x^{(1)} | y^{(2)}, x^{(2)})$  определяется соотношением  $p(x^{(1)} | y^{(2)}, x^{(2)}) =$

Если искусственно преодолевается механизм адаптационного торможения, т. е. концептуальное ядро понятий «наильно» и искусственно расширяется, то, во-первых, теряется КПД КЯПа (резко уменьшается содержательность результатов интеллектуальной деятельности), во-вторых, возникает болезнь — умственная жвачка. Этой болезнью страдают многие исследователи и чаще всего эрудиты.

Таким образом, формирование концептуального ядра понятий по данной проблеме исследования можно считать самоорганизующейся системой, управляемой, с одной стороны, информационными потоками (в частности, идеями и фактами), с другой — запасом резервных нейронов, а также гибкостью и пластичностью нервной системы.

Адаптационное торможение при формировании КЯПа вызвано приспособлением интеллектуальной базы исследователя к кризисным и интегрирующим условиям развивающейся науки. С механизмом адаптационного торможения связана устойчивость КЯПа как самоорганизующейся системы в процессе ее развития. Количество результатов (продукта) должно расти по определенному закону с ростом числа концептов. При этом КЯП будет терять устойчивость в функциональном смысле, если рост числа концептов не будет сопровождаться возникновением какой-то совокупности факторов, тормозящих чрезмерно частое появление продукта интеллектуальной деятельности и обеспечивающих более или менее устойчивое развитие КЯПа. Уравнение (4) можно рассматривать как одну из моделей неселективно работающего фильтра мозга. Интеллектуальная база исследователя в конечном смысле сохраняет свою устойчивость, сопротивляясь новым постановкам проблем и новым направлениям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чудаков В. Н. Эволюция концептуальных процедур мозга. — См. статью в настоящем сборнике.
2. Пельц Д., Эндриус Ф. Ученые в организациях. М., «Прогресс», 1973. 470 с.
3. Де Боно Э. Рождение новой идеи. Ш., «Мир», 1976. 200 с.
4. Чавчанидзе В. В. К общей теории концептуальных систем. — Сообщение ИКА СССР, Тбилиси. Препринт, 1974. 25 с.
5. Нахимов В. В., Мульченко Э. М. Наукометрия. М., «Наука», 1969, 200 с.

Поступила 25 января 1977 г.

УДК 681.3.007

В. Н. БЕЗКОРОВАЙНЫЙ

#### СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ЦИФРОВОЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Решению задач постановки диагноза, прогнозирования течения заболевания и оптимизации методов лечения с применением средств вычислительной техники посвящено большое количество

работ. Наиболее широко и полно эти вопросы освещены в [1—3].

Такое использование вычислительной техники оказалось отчасти возможным потому, что в постановке диагноза мозг человека работает в согласии с правилами логики и теории вероятностей. Связывая симптомы и болезни и устанавливая диагнозы с разной степенью достоверности, человек пользуется фактически булевыми функциями. Эта особенность диагностического процесса если и не делает переход от врачебной диагностики к машинной простым и легким, то, по крайней мере, обеспечивает разрешимость данной проблемы математическими методами. Однако для решения целого ряда задач диагностики применение универсальных ЭВМ не является рациональным, так как ведет к повышению стоимости диагноза. Возможный путь для решения этой проблемы — создание специализированных диагностических устройств. Осуществление решения задач медицинской диагностики с применением специализированных диагностических устройств требует конкретной постановки задачи и строгой формализации как исходных данных, так и ожидаемых данных конечного результата.

В настоящей работе рассматривается вопрос создания специализированного цифрового вычислительного устройства с целью упростить процесс диагностирования и уменьшить стоимость получения диагноза при использовании входной информации в дискретном виде.

Чтобы решить поставленную задачу, использовали данные дифференциально-диагностических признаков детских наследственных заболеваний — муковисцидоза, целиакии и непереносимости дисахаридов, для составления которых был использован большой статистический материал клинического, морфологического, биохимического, генеалогического и других методов исследований. Весь набор обобщающих признаков кодируется в двоичном алфавите следующим образом: присутствие признака — 1, отсутствие — 0. На основании статистического материала каждому признаку по значимости присваивается определенный весовой коэффициент  $C$ , где  $C = 2^j$ , ( $j = 0, 1, 2, 3, 4$ ). Таким образом, были составлены эталоны векторов обобщающих признаков для муковисцидоза, целиакии и непереносимости дисахаридов, которые состоят из 30 признаков для каждой болезни.

Исходная информация задается в виде двух булевых матриц: матрицы  $L$ , где  $i \in L$ ,  $L = \{1, 2, \dots, m\}$  и матрицы  $G$ , где  $j \in G$ ,  $G = \{1, 2, \dots, n\}$ . Алгоритм диагностики исследуемых заболеваний осуществляется путем последовательного сравнения вектора обобщающих признаков каждой болезни  $Y$  с входным вектором  $X$ . Сравнение осуществляется методом поразрядного логического сложения по «модулю два» вектора входных двоичных признаков  $X$  с каждым из векторов диагностических признаков эталонов  $Y$  и в соответствии с весом каждого признака производится вычи-



последовательного образования адресов болезней; генератор тактовых импульсов 5 — используется для запуска регистра адреса болезней; схемы присвоения весов 6 — представляют набор логических схем совпадения, с помощью которых реализуется последовательно во времени присвоение весовых коэффициентов каждому разряду вектора результатов суммирования по «модулю два»; счетчик приближений 7 — представляет собой суммирующий двоичный счетчик, на входы которого последовательно во времени подаются выходные сигналы с выходов схем совпадения; регистр приближений 8; блок сравнения 9; блок управления 10; блок индикации 11; блок питания 12. Работа предлагаемого устройства проверена при дифференциальной диагностике детских наследственных заболеваний муковисцидоза, целиакии и непереносимости дисахаридов.

Как известно, задача медицинской диагностики считается решенной, если удалось найти способ, позволяющий однозначным образом по результатам опроса и осмотра больного, объективным данным и некоторым лабораторным исследованиям установить диагноз. Один из путей решения поставленной задачи рассмотрен в данной работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амозов Н. М., Зайцев Н. Г., Мельников В. Г. Медицинская информационная система. Киев, «Наукова думка», 1975. 508 с.
2. Быховский М. Л., Вишневецкий А. А. Кибернетические системы в медицине. М., «Наука», 1971. 407 с.
3. Ластед Л. Введение в проблему принятия решений в медицине. М., «Мир», 1971. 282 с.
4. Безкоровайный В. Н., Кривуля Г. Ф., Немченко В. П. Устройство цифровой обработки двоичных диагностических признаков. (Получено положительное решение по заявке № 2116876/24 от 28.5.76)

*Поступила 20 декабря 1976 г.*

УДК 62.506.2

*В. М. БОНДАРЕВ*

#### АЛГЕБРАИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СЛОВ

Известно, что способность к переработке текстовой информации является важнейшим свойством человеческой психики. Для познания и моделирования этого свойства представляется целесообразным изучить процессы грамматической обработки отдельных слов языка. Цель данной работы — попытка единым образом подойти к решению таких задач морфологии как словоизменение, грамматический анализ, поиск словарной формы слова, а также дать математическое описание процесса решения этих задач.

Введем понятие морфологической функции [1]. Назовем морфологической функцией  $(n + 2)$ -местный предикат, принимающий значение 0 и 1. Обозначим его следующим образом:  $L(x, y, z_1, z_2, \dots, z_n)$ . Аргументами этого предиката являются:  $x$  — некоторое слово;  $y$  — какая-либо форма слова;  $z_1, \dots, z_n$  — грамматические признаки формы слова. Значение функции  $L$  равно нулю, если заданы внутренне противоречивые (несовместные) значения ее аргументов. В противном случае значение функции  $L$  равно единице. Например,  $L$  («дорогой», «дорогим», дательный, женский, множественное) = 1, а  $L$  («дорогой», «дорогим», дательный, женский, единственное) = 0.

Введенный математический объект по праву называется функцией, так как осуществляет однозначное отображение области значений аргументов на множество  $\{0, 1\}$ . В самом деле, из языковой практики следует, что полный набор значений аргументов не может быть совместным и несовместным одновременно. Завершая описание морфологической функции, укажем, что под словом  $x$  и формой слова  $y$  мы будем понимать любую цепочку букв русского алфавита, число букв в которой не превышает некоторого наперед заданного числа  $A$ .

Для ответа на вопрос, каким образом в терминах морфологической функции будут выглядеть задачи морфологии, перечисленные выше, рассмотрим уравнение  $L(x, y, z_1, z_2, \dots, z_n) = 1$ , которое назовем морфологическим уравнением. Ясно, что этому уравнению будут удовлетворять лишь такие  $x, y, z_1, z_2, \dots, z_n$ , которые совместимы друг с другом. Зададим некоторые значения переменных  $x, z_1, z_2, \dots, z_n$  и решим морфологическое уравнение относительно неизвестной  $y$ . В результате мы совершим переход от слова и грамматических признаков к соответствующей форме слова. Зададим теперь значение  $y$  и решим морфологическое уравнение относительно неизвестных  $z_1, z_2, \dots, z_n$ . При этом мы по известной форме слова определим соответствующие ей грамматические признаки. Наконец, зададим конкретную форму слова  $y$  и решим морфологическое уравнение относительно неизвестной  $x$ . В результате мы получим слово, соответствующее одной из его форм. Таким образом, с помощью морфологической функции легко формулируются три задачи, указанные нами ранее. Очевидно, что существует  $2^{n+2}$  задач, допускающих такую же формулировку. Три рассмотренные задачи входят в их число.

Попытаемся представить морфологическую функцию в виде суперпозиции некоторых строго определенных и достаточно простых функций [2]. Предварительно изменим обозначение переменных функции  $L$ . Дадим им сквозную нумерацию и обозначим единым символом  $x$ . Это связано с тем, что дальнейшие рассуждения будут симметричны относительно всех аргументов функции  $L$ . Поскольку область определения каждой переменной конечна, пронумеруем все значения переменной из области определения, и в выражение  $x_i = j$  будем вкладывать следующий

смысл: переменная  $x_i$  принимает  $j$ -е значение из своей области определения.

Для каждого аргумента функции  $L$  определим класс  $K_i$  функций, которые назовем характеристическими. Индекс  $i$  означает, что класс  $K_i$  соответствует  $i$ -му по счету аргументу. Обозначим эти функции через  $x_i^j$ :

$$x_i^j = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i = j, \\ 0, & \text{если } x_i \neq j \quad (i = 1, 2, \dots, n + 2). \end{cases} \quad (1)$$

Все функции класса  $K_i$  определены лишь на значениях переменной  $x_i$ , а их число совпадает с количеством различных значений соответствующей переменной.

Рассмотрим произвольный набор значений аргументов, обращающий функцию  $L$  в единицу. Определим значения характеристических функций на этом наборе. Ясно, что вся совокупность их значений однозначно определяется исходным набором значений аргументов, причем для различных исходных наборов соответствующие совокупности значений характеристических функций также будут различны.

Таким образом, мы как бы перешли от многозначного кодирования значений аргументов морфологической функции к их двоичному кодированию. Прделав описанный переход для каждого «единичного» набора значений переменных морфологической функции, получим табличное задание некоторой функции  $L_2$  двоичной логики. Условимся, что она принимает значение «1» на всех тех наборах аргументов, которые получены нами из «единичных» наборов функции  $L$ . На всех остальных двоичных наборах такой же длины определим ее значение равным «0». Известным методом перейдем от табличного задания  $L_2$  к ее СДНФ:

$$L_2 = \bigvee_{t=1}^r \bigwedge_{i=1}^{n+2} \left[ \bigwedge_{j=1}^{m_i} (x_i^j)^{\sigma} \right]. \quad (2)$$

Индекс  $\sigma$  означает, что двоичная переменная  $x_i^j$  может быть взята со знаком отрицания или без него;  $r$  — число дизъюнктивных членов в формуле, или, что то же самое, число «единичных» наборов значений аргументов морфологической функции;  $m_i$  — число всевозможных значений переменной  $x_i$ .

Рассмотрим отдельно выражение, стоящее в квадратных скобках. Нетрудно понять, что только одна двоичная переменная может входить в это выражение без показателя отрицания. Действительно, если соответствующий аргумент  $x_i$  функции  $L$  принимает свое  $q$ -е значение, то в соответствии с (1)  $x_i^q = 1$ ,  $x_i^j = 0$  ( $j = 1, 2, \dots, q - 1, q + 1, \dots, m_i$ ). Зафиксируем этот факт:

$$\bigwedge_{i=1}^{m_i} (x_i^j)^{\sigma} = x_i^q \wedge (\neg x_i^1 \wedge \neg x_i^2 \wedge \dots \wedge \neg x_i^{q-1} \wedge \neg x_i^{q+1} \wedge \dots \wedge \neg x_i^{m_i}). \quad (3)$$

Но с другой стороны справедливо тождество

$$x_i^q = \neg (x_i^1 \vee x_i^2 \vee \dots \vee x_i^{q-1} \vee x_i^{q+1} \vee \dots \vee x_i^{m_i}), \quad (4)$$

которое непосредственно отражает то, что переменная  $x_i$  может принять  $q$ -е или одно из остальных значений, причем один из исходов исключает другой. Преобразуем (4) по правилу де Моргана:

$$x_i^q = \neg x_i^1 \wedge \neg x_i^2 \wedge \dots \wedge \neg x_i^{q-1} \wedge \neg x_i^{q+1} \wedge \dots \wedge \neg x_i^{m_i}. \quad (5)$$

Подставим выражение (5) в (3):

$$\bigwedge_{i=1}^{m_1} (x_i)^q = x_i^q \wedge x_i^q = x_i^q, \quad (6)$$

а затем (6) в (2):

$$L_2 = \bigvee_{t=1}^T \bigwedge_{i=1}^{n+2} x_i^{q_i}. \quad (7)$$

Индекс, появившийся у показателя  $q$ , означает, что каждый аргумент принимает свое значение независимо от остальных. Если вспомнить о том, что двоичные аргументы функции  $L_2$  сами являются функциями от многозначных аргументов  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n+2$ ) морфологической функции, то выражение (7) можно считать записью функции  $L$  в виде суперпозиции дизъюнкции, конъюнкции и характеристических функций:

$$L = \bigvee_{t=1}^T \bigwedge_{i=1}^{n+2} x_i^{q_i}. \quad (8)$$

Множество характеристических функций, дизъюнкцию и конъюнкцию естественно назвать базисом, в котором записана функция  $L$ . Этот базис полон в том смысле, что в нем может быть записана любая морфологическая функция. Справедливость этого утверждения вытекает из самого процесса построения выражения (8).

Ранее говорилось, что количество характеристических функций в отдельном классе равно числу элементов области определения соответствующей переменной. Поэтому число характеристических функций в классе таких аргументов, как форма слова или его словарная форма, должно быть очень велико. Если существует отображение, позволяющее взаимно-однозначно сопоставить всякому набору значений переменных морфологической функции некоторый набор значений других переменных, число которых может быть больше, но области определения невелики, то можно воспользоваться этим отображением и определить функцию  $L$  на новом наборе переменных.

Примером такого отображения может служить разбиение русских слов на буквы с указанием для каждой буквы ее позиции в слове или разбиение слов на морфы с указанием для каждого

морфа его значения. В первом случае все слова следует дополнить пробелами до длины, которую имеет самое большое слово, и считать пробел особой буквой. Во втором — следует считать отсутствие некоторого морфа в слове его особым, нулевым значением. В обоих случаях уменьшается суммарное число функций в базе, а главное, построенная в этом базе функция приобретает «объяснительную силу». Другими словами, в своей структуре она может отражать связь между значениями морфов и грамматических признаков или между другими категориями морфологии.

Присутствие в базе операций дизъюнкции и конъюнкции позволяет широко пользоваться известным тождеством алгебры логики

$$x \wedge y \vee x \wedge z = x \wedge (y \wedge z) \quad (9)$$

в целях уменьшения размеров выражения, описывающего морфологическую функцию.

Кроме того, это позволяет разложить выражение для морфологической функции на независимые части, применив некоторый аналог известной в алгебре логики теоремы о разложении. По-видимому, только расчленив выражение (8) на более или менее простые части, зависящие от меньшего числа переменных, чем все выражение в целом, можно подойти к практической реализации морфологической функции, скажем, в виде программы для ЭВМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Математическое моделирование процессов грамматической обработки словоформ русского языка. — Тезисы VIII Всесоюзного симпозиума по кибернетике. Тбилиси, 1976, с. 524—526. Авт.: Т. А. Недзельская, А. Ф. Осыка, А. И. Чугун, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко.
2. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Применение метода нуля-органа в лингвистике. См. статью в настоящем сборнике.

*Поступила 9 марта 1977 г.*