

**Республиканское общественное объединение  
«Национальная инженерная академия Республики  
Казахстан»**

**Научно-техническое общество «Кахак»**

Г.А. Мун, Б.Б. Ермухамбетова, Е.С. Витулёва, А.Ж. Аликулов, И.Э. Сулейменов

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ**

Алматы 2023

**УДК 004.316.77.  
ББК 32.973.202  
И 89**

Рекомендовано Научно-техническим советом РОО «Национальная инженерная академия Республики Казахстан»

Современные методы исследования и теория информации // Г.А. Мун, Б.Б. Ермухамбетова, Е.С. Витулёва, А.Ж. Аликулов, И.Э. Сулейменов – Алматы: Изд-во «Print Express», 2023. - 118 с.

ISBN 978-601-7946-11-9

Рецензенты: Доктор химических наук, профессор К.Б. Мусабеков;  
Доктор химических наук, профессор С.М. Тажибаева

Настоящая монография подготовлена и опубликована при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № ИРН BR21882289).

В монографии рассматривается вопрос об актуальности конвергенции естественнонаучного и гуманитарного знания, показано, что существует методологическая основа для единообразного анализа экспериментальных данных, отражающих поведение систем различной природы.

Показано, что в современных условиях, когда объем информации, представленной в доступных ресурсах, непрерывно возрастает, философское переосмысление всего того, что связано с категорией информации, становится остро необходимым. Более того, именно такой подход позволяет поставить и по крайней мере частично решить задачу о достижении цифрового бессмертия, способную стать мощным мотивирующим и консолидирующим фактором.

Адекватность развиваемого подхода продемонстрирована на примере решения конкретных задач, связанных с описанием физико-химических процессов, протекающих в системах на основе гидрофильных полимеров, а также на примере анализа рынка криптовалют в планетарном масштабе.

УДК 004.316.77.  
ББК 32.973.202  
И 89

ISBN 978-601-7946-11-9

© Г.А. Мун, И. Молдахан, Е.С. Витулёва,  
Б.Б. Ермухамбетова, А.Ж. Аликулов, И.Э.  
Сулейменов

## Оглавление

Введение .....	4
1. Проблема сущности мышления: необходимость создания новых подходов к обработке экспериментальных данных.....	8
2. Проблема сущности мышления и интеллекта с точки зрения концепции цифрового бессмертия .....	19
3. Коллективная составляющая интеллекта и многозначные логики.....	28
4. Цифровая обработка сигналов с точки зрения использования многозначных логик: методологический аспект .....	39
5. Принципиальные особенности радиочастотных спектров медленно изменяющихся сигналов.....	46
6. Алгоритмическая основа цифровой обработки сигналов на основе разбиения спектрального интервала на троичные группы.....	54
7. Дальнейшее совершенствование методов обработки медленно изменяющихся сигналов.....	65
8. Радиотехнический метод определения температуры фазового перехода в растворах термочувствительных полимеров.....	77
9. Переходные процессы: вопрос о количестве информации, содержащейся в гладкой кривой .....	88
10. Квазиколебательные процессы: рынок криптовалют и возможности перехода к анализу медленно изменяющихся процессов .....	94
11. Поля Галуа и методологические аспекты решения физических задач в терминах многозначных логик .....	105
Заключение.....	108
Литература .....	110

## **Введение**

Объём информации, с которым сейчас имеет дело человечество, день ото дня растёт, что не требует развёрнутых доказательств.

Информация представлена в самой различной форме и уже давно сформированы такие научные направления как Big Data, Data Mining и им аналогичные. Идея, которая лежит в их основе достаточно проста. Коль скоро существует огромный массив информации, то следует попытаться вычленить из него те или иные закономерности, описывающее, например поведение общества как целого или отдельных социальных групп. Такая постановка вопроса, разумеется, более чем оправдана. Однако можно пойти дальше.

А именно, каждый пользователь социальной сети так или иначе оставляет некий «цифровой след». Говоря более точно, он формирует свой определённый цифровой образ – совокупность сгенерированной им информации, зафиксированной в Интернет-ресурсах. Выражаясь метафорически в социальных онлайн сетях, а шире в Интернете в целом, формируется некий цифровой эгзор каждого пользователя.

Этим обстоятельством можно воспользоваться в самых разных целях. Наиболее заманчивой целью здесь является, конечно, реализация концепции цифрового бессмертия.

Как вытекает из достаточно очевидных философских соображений, которые подробнее рассматриваются в тексте этой монографии, интеллект человека, его разум и сознание представляет собой не что иное как некие системы переработки информации.

Говоря упрощённо, это – некий алгоритм, который в принципе может быть перенесен на небиологический носитель информации. Разумеется, эта цель является очень и очень отдалённой, однако уже сейчас, как это тоже показано в тексте данной монографии, можно говорить о том, что по крайней мере отдельные составляющие личности могут быть перенесены, упрощенно говоря в компьютер. Такие тенденции просматриваются.

В частности, не так давно средства массовой информации широко разрекламировали поздравления, которые были сделаны звёздам Голливуда от лица их умерших родственников. Разумеется, это не более чем имитация цифрового бессмертия, но вопрос уже поднят, и на него так или иначе придётся отвечать.

Впрочем, как бы фантастически не звучали все эти тезисы, они отражают вполне определенную и более чем реальную тенденцию. Из того массива данных, которые существуют в интернете, можно черпать всё более и более полную информацию. Если же подойти к вопросу методологически правильно, то тогда, используя этот массив информации, можно установить некие закономерности, которые окажутся практически полезными.

Следовательно, вопрос о новых подходах к обработке экспериментальных данных заведомо приобретает два аспекта. Один из них чисто технический, а другой – безусловно философский.

Для того, чтобы адекватно работать с качественно новым объектом нужна адекватная методология. Эту методологию, особенно, когда речь идет о пограничной области между точными и гуманитарными науками, может дать в конечном счёте только философия, что и демонстрирует вся история развития науки. Здесь уместно напомнить то во многом забытое обстоятельство, которое, впрочем, отражено во многих известных литературных источниках.

Та, область знаний, которая сейчас именуется логикой, создавалась как средство установления законов мышления. Именно так ставил вопрос ещё Аристотель.

Эта тенденция во многом оказалась утраченной, но это не означает, что к ней нельзя вернуться. Именно это и имеет самое прямое отношение в том числе и вопросу о цифровом бессмертии.

Действительно, ещё в начале текущего столетия многими авторами было показано, что мощность вычислительных машин уже вполне достаточна для того, чтобы перенести по крайней мере некоторые составляющие интеллекта и сознания на не биологический носитель. С тех пор вычислительные средства только совершенствовались и сейчас их мощности вполне достаточно для того, чтобы эту процедуру осуществить. Далеко не случайно периодически (в том числе в средствах массовой информации) всплывает вопрос о «е-существо», то есть о человеке, который перенёс свою индивидуальность, грубо говоря, в компьютер. Но, мощность вычислительных средств — это только полдела.

Важно понять, **что именно** нужно записывать в компьютер, а здесь стародавний вопрос о законах мышления приобретает неожиданную актуальность.

Для того, чтобы разработать методику «перезаписи» индивидуальности в компьютер сначала нужно понять, что туда записывать. Нужно понять, что такое интеллект, что такое разум и что такое сознание. На этот вопрос пытались ответить представители самых различных дисциплин, исходя из самых различных точек зрения. В частности, нейрофизиология добилась более чем впечатляющих успехов в раскрытии механизмов того, как функционируют нервные клетки. Но, если принять во внимание очевидные философские соображения, это даже не полдела.

Для того, чтобы соответствующие подходы действительно могли бы быть реализованными важно понять, что представляет собой интеллект как таковой. Это тем более важно, что значительная часть ресурсов головного мозга человека в действительности тратится на «обслуживание» физиологических процессов.

Значительный вклад в изучении функционирования сознания внесла также психология. Но, и здесь методологические ограничения также играют свою более чем значительную роль. В частности, классическая психология как правило изучает индивида, в то время как он в действительности погружен вполне в определенную коммуникационную среду, что, как показано в

материалах настоящей монографии, является принципиально важным обстоятельством.

В этой книге будет доказываться, что мышление человека не является, строго говоря, индивидуальным. Точнее, речь идёт о том, что такие информационные сущности как интеллект, сознание и разум человека дуальны по своей природе. В них одновременно присутствует и коллективная и индивидуальная составляющая. Более того, есть все основания полагать, что в настоящее время коллективная составляющая разума и сознания только усиливается в связи с бурным развитием телекоммуникаций.

Человек, погружаясь в социальные онлайн сети, постепенно теряет свою индивидуальность, они диктуют ему стиль поведения, привычки и прочее в том же духе, но здесь есть и позитивный момент. А именно, коль скоро гигантские объёмы информации перекачиваются в Интернет, то тогда можно попытаться абстрагировать из поведения пользователей социальных онлайн сетей законы мышления.

На страницах данной монографии подробно доказывается, что законы мышления вовсе не обязательно должны иметь отношения к аристотелевской логике. Впрочем, это ясно и так. Как говорят злые языки, большинство из наших современников мыслят логически, только считая деньги.

В остальном их сознание мифологично и, следовательно, абстрагировать законы мышления крайне сложно, если пытаться ориентироваться только на формальную логику, даже многозначную. Последователи Аристотеля достигли огромных успехов, но к законам мышления достижения современной логики имеют, мягко говоря, очень отдалённое отношение, особенно если принять во внимание сказанное выше.

Мышлению вовсе не обязательно быть «логичным» даже в смысле многозначной логики. Иначе говоря, для того, чтобы постичь законы мышления нужно сделать примерно тоже самое, что некогда сделал Аристотель, но только в другом ключе. Аристотель абстрагировал законы логики фактически из геометрии. Здесь же можно поставить вопрос иначе – абстрагировать законы мышления, а, следовательно, и сущность того, что именуется интеллектом, исходя из анализа реального поведения пользователей социальных онлайн сетей.

Ещё раз подчеркиваем, человек будучи погруженным в коммуникационную среду оставляет всё более и более выраженный цифровой след. Его можно и нужно проанализировать для того, чтобы понять, а как человек думает на самом деле.

На страницах данной монографии отстаивается следующий тезис. В теории информации есть такое понятие как «чёрный ящик». Подразумевается, что вскрыть механизм функционирования того или иного устройства можно даже и тогда, когда реальный принцип его действия неизвестен. Достаточно знать связь между тем, что творится на входе, и тем, что творится на выходе. Соответственно с учетом того, что человек всё более и более погружается в коммуникационную среду возникает возможность установить законы мышления и установить характер функционирования головного мозга, не прибегая к

инструментам физиологии. Эта задача архисложна. Подчеркнем еще раз, что значительная часть ресурсов головного мозга расходуется на обеспечение физиологических процессов и отделить одну функцию от другой, изучая головной мозг средствами биологии и нейрофизиологии, крайне сложно.

Гораздо проще воспользоваться инструментами теории информации, что ещё раз возвращает к вопросу о разработке новых нетривиальных подходов к обработке экспериментальных данных.

Основная идея книги состоит в следующем. Отталкиваясь от рассмотрения достаточно простых ситуаций, мы покажем, что возникает возможность свести описание физических процессов к определённому ограниченному набору параметров, которые могут быть поставлены в соответствие переменным многозначной логики. Далее мы перейдём к рассмотрению более сложных процессов в том числе и связанных с поведением рынка криптовалют, причём в планетарном масштабе, и покажем, что даже такая довольно сложная система также может быть сведена к описанию в терминах многозначной логики.

В заключительной главе мы продемонстрируем, что многозначная логика применима к описанию вообще любых мыслимых процессов.

Тем самым закладываются основы для того, чтобы постепенно перейти к решению той сверхзадачи, о которой говорилось выше.

Разумеется, многие положения, отражённые в данной монографии, являются, мягко говоря, дискуссионными, но авторы специально пошли на это для того, чтобы привлечь внимание широкой аудитории к существованию данных проблем.

Мы будем искренне признательны за критику, тем более что значительная часть материала этой монографии написана молодыми учёными в рамках их диссертационных работ.

Часть выводов являются выверенными, они получены в результате выполнения работ в рамках грантового проекта ИРН АР08856723 «Разработка и реализация нового подхода по определению реологических параметров жидкофазных мультикомпонентных систем с использованием реовискозиметра нового типа» Комитета науки Министерства науки и высшего образования РК. Другая часть выносится на широкое обсуждение для стимулирования дискуссий.

В целом монография представляет собой попытку синтеза уже полученных и верифицированных результатов с тем, чтобы наметить путь к решению сверхзадачи каковой, разумеется, является достижение цифрового бессмертия.

## **1. Проблема сущности мышления: необходимость создания новых подходов к обработке экспериментальных данных**

Постижению сущности мышления отдали дань многие из величайших мыслителей прошлого (от Декарта до Канта), но эта проблема с очевидностью будет оставаться нерешенной до конца еще долгое время. Мы, разумеется, также не претендуем на то, чтобы решить ее в отдельно взятой книге. Мы видим свою задачу в другом.

А именно, проблема сущности мышления с очевидностью актуализируется в силу бурного развития систем искусственного интеллекта, которое уже ставит перед исследователями вопросы сугубо философского характера, причем далеко не только этические.

Так, один из наиболее крупных специалистов в области философии логики и математической логики А.С. Карпенко в статье [1] отмечает: «Габбай предсказывает, что недалек тот день, когда ученый в области компьютерных наук проснется с осознанием того, что его профессиональный род деятельности принадлежит формальной философии.»

Тем самым, перед прикладной философией встает весьма нетривиальная проблема: обеспечить конвертацию философского понимания мышления в форму, которую специалисты в области информационных технологий могут использовать в непосредственной практической деятельности, в частности, для разработок систем искусственного интеллекта (ИИ), приближающегося по своим возможностям к интеллекту человека. (Такой ИИ часто именуют «сильным».)

С сугубо утилитарной точки зрения, роль прикладной философии состоит в том, чтобы обеспечить идейную основу для формирования междисциплинарных коллективов, создающих, в том числе, нетривиальные системы искусственного интеллекта. В соответствии с [2], специалист в области прикладной философии в таких коллективах выступает в качестве «генерального конструктора», формирующего «технические задания» для специалистов в области конкретных наук.

В данной монографии, в том числе, предпринимается попытка разработать основы методологии, позволяющей раскрыть сущность мышления, основываясь именно на этих позициях.

Здесь имеется вполне определенный нюанс.

Вопрос о создании систем искусственного интеллекта человеческого уровня уже давно обсуждается в литературе [3], причем все чаще по отношению к нему применяется термин «мышление» [4].

При этом в философской литературе мышление рассматривается в основном через призму психической деятельности человека, причем разработки в области искусственного интеллекта пока что не оказали выраженного влияния на такое положение дел (имеются только отдельные исключения, в частности, работы [5-7]). Так, в монографии [8], в которой, в том числе, рассматривается проблематика искусственного интеллекта, приведено следующее определение.

«Мышление – психический процесс отражения действительности, высшая форма творческой активности человека. Суть мышления – в выполнении



когнитивных операций с образами во внутреннем плане, которые позволяют строить и достраивать меняющуюся картину мира...»

Весьма показательной в рассматриваемом отношении является работа [9], где специфика мышления трактуется как **познавательный** психический процесс, результатом которого является возникновение **понимания**, а специфика мыслительной деятельности трактуется как специально организованная и сознательно регулируемая активность человека, направленная на достижение понимания.

Данную трактовку А.Ф. Корниенко [9] дает на основе анализа точек зрения на когнитивные процессы, отражающих, главным образом, результаты исследований в области психологии. К ним, в частности, относятся и точки зрения, отраженные в учебной литературе по психологии [10], в соответствии с которыми мышление это – процесс отражения связей и отношений, недоступных непосредственному чувственному восприятию, сопровождающийся переживанием чувства понятности (понимания) ситуации. В такой трактовке учитывается не только функциональная специфика мышления как процесса психического отражения, но и его специфический результат.

Подход, в котором мышление анализируется преимущественно через призму психической деятельности человека, следует признать устаревшим по следующим причинам. Если мышление присуще только человеку, то создание истинно «сильного искусственного интеллекта» (т.е. приближающегося по своим свойствам к человеческому) следует недостижимым.

Действительно, формой проявления интеллекта, во всяком случае, «сильного» является мышление, следовательно, если мыслить способен только человек, то и интеллектом также может обладать только человек.

Если же быть последовательным и признать, что искусственный интеллект существовать может, то на вопрос, столь популярный в дискуссиях 1960-х годов «Может ли машина мыслить?» следует отвечать утвердительно.

С нашей точки зрения, которая коррелирует с выводами работы [11], ответ на этот вопрос можно сформулировать следующим образом. Разновидностей мышления существует достаточно много. Отметим, что это утверждение во многом коррелирует также с теорией множественного интеллекта Говарда Гарднера [12], активно используемой в последнее время в педагогике [13].

Некоторые из разновидностей мышления могут быть «переданы машине», некоторые, вполне возможно, – нет.

Точнее, существуют формы мышления, которые могут быть реализованы на носителях информации произвольной природы, в том числе, на электронных, уже в обозримой перспективе. Несколько забегаю вперед, отметим, что интеллект, сознание и разум человека – это отнюдь не синонимичные понятия, и в данном разделе мы говорим об интеллекте и только об интеллекте.

Далее, психическая деятельность человека – это совокупность более чем сложных процессов, которые весьма непросто изучать экспериментально. Экспериментальная психология де-факто работает только с опосредованными проявлениями психической деятельности. Во всяком случае, нельзя изучить

работу головного мозга на том уровне, на котором можно изучить работу электронной схемы.

Следовательно, необходимо обеспечить максимально широкое понимание мышления как такового, а также выявить те его формы, которые могут быть реализованы на носителях информации произвольной природы.

Подчеркиваем, что вывод о множественности форм мышления (даже если ограничится рассмотрением только той единственной разновидности разума, которая достоверно известна на сегодняшний день) отчетливо коррелирует также и с представлениями о сложной структуре личности. В литературе по психологии известны схемы структуры личности по Юнгу, по К.К. Платонову, по Рубинштейну, по Фрейду и т.д. [14-16]. Действительно, с общеметодологических позиций сложный характер структуры личности отвечает, как минимум, многоплановости характера самого мышления.

Возвращаясь к базовому тезису данного раздела о роли прикладной философии в разработках систем искусственного интеллекта, можно конкретизировать преследуемую нами цель.

А именно, она состоит в том, чтобы средствами прикладной философии определить характер тех задач, которые должны решать информационные технологии для того, чтобы выявить именно те формы (или уровни) мышления, которые могут быть «переданы машине» и, тем самым, создать предпосылки для истолкования сущности мышления на данной основе.

Отметим, что именно эту задачу, в сущности, некогда решил Аристотель. Как отмечается в [17, стр.211]

«Начало логике как науке было положено сочинением Аристотеля «Органон»; по признанию Аристотеля, он выделил законы мышления, непосредственно используемые математиками, абстрагировал их от частных и обнаружил, что эти законы обладают универсальной применимостью.»

Само название «Органон», т.е. «инструмент» [мышления] подчеркивает, что Аристотель ставил перед собой именно такую задачу – установить законы мышления. Именно на том фундаменте, который заложил Аристотель, Дж. Булем и его последователями далее была создана символическая (математическая) логика, которая и лежит в основе всей современной вычислительной техники.

Следовательно, нельзя не признать, что существуют общие законы мышления, который уже «переданы машине», причем первоначально данные законы были сформулированы именно на философской основе. Следовательно, развиваемый нами подход ни в малейшей степени не противоречит давней философской традиции.

Другое дело, что двоичная логика, на которой построена вся современная вычислительная техника, оказывается слишком «бедной» для того, чтобы обеспечить установление более глубоких законов мышления, отражающих реальные мыслительные процессы, протекающие в головном мозге человека. В частности, двоичная логика не вообще не оперирует категорией модальности

(которая в обыденном языке выражается словами «может быть»), существуют с значительными сложностями с использованием операции импликации.

Попытка преодолеть ограниченность логики Аристотеля (в указанном выше смысле) была предпринята еще в начале XX века. Под влиянием создания неевклидовых геометрий были созданы многозначные логики Н.А. Васильева [18] и Я. Лукасевича [19], который ввел в употребление дробное значение логической переменной  $\frac{1}{2}$  (1 – истинно, 0 – ложно,  $\frac{1}{2}$  – не определено). Как отмечается в [18], Н.А. Васильев назвал свою логику «воображаемой», т.е. в том же ключе, что и Н.И. Лобачевский, который также первоначально назвал свою геометрию «воображаемой».

Проблема, однако, состоит в том, что многозначных логик на сегодняшний день существует очень много [20]. Более того, в цитируемой монографии подчеркивалось, что до сих пор остается нерешенной проблема интерпретации переменных многозначной логики.

Шире, можно утверждать, что несмотря на значительный прогресс в данной области исследований, многозначная логика весьма далека от постановки вопроса в ключе Аристотеля. Связь между современным аппаратом многозначной логики и реальными законами мышления если и просматривается, то весьма отдаленно.

С общеметодологической точки зрения, разумеется, должна существовать связь между множественностью мышления (например, в понимании Говарда Гарднера) и вариативностью многозначных логик, построенных в настоящее время [20], однако, такая связь остается не выявленной. Более того, неочевидно, что такую связь можно выявить, отталкиваясь только лишь от рассуждений того или иного плана.

Скорее, нужно развить методологию исследований, которые позволят решить эту проблему классическим для естественных наук способом. Он предполагает, что на основе ограниченной совокупности экспериментальных данных строится соответствующая теория, которая далее верифицируется на основе более широкого круга экспериментов. Но для того, чтобы этим способом можно было воспользоваться нужна методология, что и составляет, в соответствии со сказанным в [2], одну из базовых задач современной прикладной философии.

Основой для построения указанной выше методологии является вывод, сделанный в работах [21, 22]. В этих работах было показано, что интеллект, прежде всего представляет собой систему переработки информации. Точнее, подобно тому, как существуют различные уровни организации материи (от механического до социального), так существуют и различные уровни организации систем переработки информации (Табл.1.1).

Один из доводов в пользу вывода о существовании иерархии систем переработки информации состоит в следующем.

Простейшим информационным объектом является запись сообщения буквами алфавита или же запись числа определенного числа в той или иной системе счисления. По существу, это единственный информационный объект,

который изучен досконально. В частности, только применительно к нему существуют процедуры, позволяющие вычислять количество информации (формула Шеннона).

Таблица 1.1. Иерархия уровней организации материи и информации

Уровни организации материи	Уровни организации информации
<b>Неорганический уровень</b> Подуровни: микромир: субмикроэлементарный микроэлементарный – ядерный – атомарный – молекулярный уровни макромир: макроскопические тела мегамир: планеты – звездно-планетные комплексы – галактики – метagalактики	Неотчужденная информация, информация, отчуждаемая (записываемая) в результате физико- химических взаимодействий
<b>Биологический уровень</b> Подуровни: уровень биологических макромолекул клеточный уровень микроорганизменный уровень уровень органов и тканей уровень организма в целом популяционный уровень биоценозный уровень биосферный уровень	Относительно обособленная информация, обладающая собственным поведением, самоорганизующаяся информация
<b>Социальный уровень</b> Подуровни: уровень индивидов уровень семьи уровень коллективов уровень социальных групп уровень национальностей и наций уровень государств и систем государств (цивилизаций) общечеловеческий (ноосферный) уровень	Информация, осознающая самое себя, высшие информационные сущности различной природы

Рассмотрим теперь правила оперирования с целыми числами (одним из таких правил является сложение «в столбик»).

Такие правила могут быть записаны в текстовой форме, как это и делается в учебниках. Следовательно, с формальной точки зрения к ним можно применить формулу Шеннона, вычислив количество содержащейся в них информации. Однако, такой подсчет не будет отражать сути дела. Правила сложения, будучи

сугубо информационным объектом, принципиально отличаются от простейшего информационного объекта, скажем, записи числа. Эти правила – информационный объект более высокого уровня, точнее они представляют собой систему простейшую систему переработки информации. Действительно, с их помощью можно получать новую информацию – результат сложения [22, 23].

Системой переработки информации еще более высокого порядка являются, скажем, законы Ньютона, записанные в математической форме. Как показывает вся история науки, из этих законов можно получать все новую и новую информацию, применяя их к решению конкретных задач.

Еще более высокое положение в рассматриваемой иерархии занимают системы переработки информации, которые позволяют формировать системы переработки информации, относящиеся к более низким уровням. Очевидным примером здесь является интеллект человека, который и позволил, в том числе, сформулировать многочисленные законы физики (и не только), формулируемые в математической форме, а также правила, позволяющие получать на их основе новую информацию – решение конкретных задач.

Данные правила также представляют собой систему переработки информации, причем еще более высокого уровня, нежели тот, к которому относятся, например, законы Ньютона. Действительно, они самым тесным образом связаны с законами логики, преобразованные в символическую форму трудами Дж. Буля и его последователей, которые, напомним еще раз изначально рассматривались именно как законы мышления.

С современной точки зрения, которая сформировалась, в том числе, в рамках исследований в области искусственного интеллекта, можно сформулировать следующий тезис.

Законы логики – понимаемые в логике Дж. Буля как законы мышления – применяемые для решения конкретных задач, ***уже можно рассматривать как искусственное моделирование процесса мышления, причем в преобразованной форме.***

Поясним этот тезис следующим образом. История техники знает многочисленные примеры, когда конкретные технические системы создавались фактически на интуитивной основе, подкрепленной обычным жизненным опытом. Весьма совершенное парусное вооружение кораблей (например, «латинский» парус) появилось задолго до того, как соответствующие задачи стали решаться на основании формализованных законов механики. Этот пример демонстрирует, что для решения одной и той же задачи могут быть использованы различные способы рассуждений, но, обобщая, и тот, и другой способ может рассматриваться ***как проявления мышления.***

Подчеркиваем, физик или математик, решая задачу, ***использует вполне определенный набор правил, составляющих в совокупности искусственную систему переработки информации.***

Заметим также, что с методологической точки зрения вопрос о конкретной форме реализации системы искусственного интеллекта вторичен. Уместна следующая аналогия. Правила сложения чисел будут одинаковыми независимо

от того, при помощи каких именно средств они реализуются – через сложение «в столбик» на бумаге или при помощи компьютера.

В этом смысле допустимо утверждать, что системы искусственного интеллекта, во всяком случае, достаточно простой разновидности, известны уже достаточно давно. Точнее, допустимо говорить о существовании комбинированных систем, в которые присутствует существенная доля искусственного. Именно этот вывод и позволяет внести существенные корректировки в те представления о мышлении как таковом, которые отражены, в частности, в цитированной выше литературе.

Действительно, даже если отталкиваться от интерпретации мышления через понятие «понимания», то и здесь роль искусственных систем переработки информации будет более чем значительной.

Наиболее типичный пример в данном отношении составляет аппарат квантовой механики. Многие ее положения вообще не могут быть сформулированы корректно иначе, кроме как на языке математических формул. Например, в квантовой механике физическим величинам соответствуют операторы (в частности импульс уже не рассматривается как вектор, который можно воспринять на интуитивном уровне, он изображается оператором). Та или иная степень понимания квантовой механики, следовательно, непосредственно зависит от существования искусственных систем переработки информации, в частности, аппарата дифференциальных уравнений в частных производных.

Тем самым, сущность мышления не может быть сведена только к процессам, которые протекают в той природной нейронной сети, которая локализована в пределах головного мозга отдельного человека. В процессе мышления заведомо используются и инструменты, созданные искусственно.

В этом отношении уместно также отметить, что, как показывают исследования Lévy-Bruhl, L. [24], в примитивных культурах отсутствовало логическое мышление как таковое.

Следовательно, мышление допустимо трактовать как сложный процесс взаимодействия совокупности систем переработки информации нейрофизиологического происхождения с «внешним контуром» - с системами переработки информации, создаваемыми искусственно. Иначе, наряду с индивидуальным сознательным в рассмотрение должно входить также и коллективное сознательное [25,26], к которому, в частности, относится та совокупность инструментов, созданных искусственно, которая позволяет сделать мышление более эффективным (в частности, символическая логика). Отметим, что коллективное сознательное является новым термином, более подробно оно будет рассматриваться в последующих разделах.

Представления о существовании коллективного сознательного основаны на выводе о дуальной природе интеллекта и сознания человека [25-27]. В нем одновременно наличествует и индивидуальное, и коллективное начало. Доказать это, следуя цитированным работам, можно и не прибегая к математическим выкладкам.

Мышление реализуется благодаря обмену сигналами между нервными клетками – нейронами, – входящими в состав головного мозга. Более того, любое общение между индивидами, де-факто также сводится к обмену сигналами между нейронами, входящими в состав головного мозга собеседников. Принято считать, что индивиды обмениваются информацией, но в действительности это является приближением, причем весьма грубым. Информация не может передаваться без носителя (в качестве такового и выступают физические процессы, определяющие обмен сигналами между нейронами), т.е. в действительности при любом общении между индивидами возникает общая нейронная сеть. Подчеркнем, что это имеет место даже и тогда, когда общение осуществляется с помощью средств телекоммуникации: электрические сигналы, идущие по проводам в итоге все равно преобразуются в сигналы, которые воспринимают нейроны, обеспечивающие восприятие света или звука.

Далее, способность нейронной сети перерабатывать информацию нелинейно зависит от числа составляющих ее нейронов. В частности, на основании точных математических моделей можно показать, что объем памяти нейронных сетей, обладающих отрицательными обратными связями, резко нелинейно зависит от числа нейронов [28].

Следовательно, в тот момент, когда в результате общения между индивидами возникает общая нейронная сеть, то возникает и некое новое качество – новый «сегмент» общей памяти, куда может быть записана информация, только косвенно связанная с той, что хранит память индивидов.

Тем самым имеются прямые доказательства того, что существует надличностный уровень переработки информации, а, следовательно, и надличностных информационных объектов [25-27]: надличностный уровень информации заведомо не может быть «пустым», поскольку он в той или иной степени связан с теми процессами, которые протекают в локальных сегментах общей сети, локализованных в пределах головного мозга индивидов.

Вывод о существовании надличностного уровня переработки информации допускает также и наглядную демонстрацию на основе модели процедуры голосования, предложенной в [29,30]. Было показано, что схема голосующего Совета (например, диссертационного) топологически эквивалентна схеме нейропроцессора Хопфилда. Это связано с тем, что в процессе голосования члены Совета принимают решение отнюдь не независимым образом. Например, член диссертационного совета может проголосовать против достойной диссертации, если ее защищает ученик оппонента или конкурента, заседающего в том же совете. Если связи такого рода являются достаточно разветвленными, решение де-факто принимают не члены Совета совокупно, но сформированная ими нейронная сеть, т.е. надличностная информационная структура.

Вывод о существовании надличностных информационных структур и дуальной природы сознания, разумеется, приводит к выводу о том, что трактовка мышления как такового должна кардинально измениться. Мыслительная деятельность человека, в том числе, определяется эффектами коллективной природы.

Уместно отметить, что тезисы, коррелирующие со сделанным выводом, достаточно широко представлены в литературе. Так, в работе [31] также обсуждалась коммуникативная природа мышления. Основные положения неклассической психологии [32,33] также принимают во внимание значимость фактора межличностных коммуникаций, но о вывод о формировании надличностного уровня обработки информации позволяет дать такого рода представлениям последовательную естественнонаучную интерпретацию.

Таким образом, можно утверждать, что грань между мыслительными процессами, протекающими в пределах головного мозга индивида и процессами переработки информации, протекающими в коммуникационном пространстве, как минимум, оказывается весьма зыбкой.

Точнее, *возникает своего рода петля обратной связи*. Результатом мыслительной деятельности отдельных людей становятся инструменты мышления искусственного характера (символическая логика, например). Далее они ассимилируются коллективным сознательным и модернизируют процессы мышления других людей. О модернизации в данном отношении говорить вполне уместно. Выражение «мыслить абстрактно» не имело бы под собой никакой почвы, если бы ранее не были созданы инструменты, которые позволяют реализоваться такой форме мышления.

Существование подобной петли обратной связи и позволяет сформулировать основную задачу прикладной философии в аспекте создания методологии, обеспечивающей совершенствование систем искусственного интеллекта, а также установления сущности мышления.

Вернемся к вопросу о сущности логики в понимании Дж. Буля и его последователей, которые, подчеркнем еще раз рассматривали эту дисциплину как средство установить законы мышления.

Принимая во внимание тезис о множественности процессов мышления, можно утверждать, что классическая логика раскрыла и формализовала только одну из возможных их разновидностей. Коль скоро существуют и другие, то встает вопрос о том, как именно можно сделать то же самое (в частности, обеспечить формализацию) по отношению и к ним тоже.

Сделать это сугубо умозрительным путем вряд ли возможно. Напомним, что многозначная логика развивается уже более столетия, и если бы законы, отражающие функционирования иных форм мышления, можно было бы абстрагировать из, скажем, анализа текстов или достижений конкретных наук, т.е. пройти путем Аристотеля, то это уже было бы сделано.

Остается обратиться, в том числе, к эмпирическим исследованиям, т.е. попытаться установить, как именно мыслит человек на практике, каким именно законам реально подчиняются присущие ему формы мышления.

Парадоксально, но подобная задача в настоящее время остро стоит и по отношению к искусственному объекту – искусственным нейронным сетям (ИНС).

Напомним, что подавляющее большинство существующих ИНС не имеет явно прописанных алгоритмов. Функционирование ИНС обеспечивается их



обучением. Нейронной сети «предъявляются» объекты из обучающей выборки, например, литер алфавита. Адекватно обученная ИНС приобретает способность распознавать/классифицировать объекты, фактически проводя сравнение с объектами из обучающей выборки. Какой именно алгоритм нейросеть использует на практике, при этом остается неизвестным. Подчеркиваем: известны и хорошо разработаны алгоритмы обучения нейронных сетей, но само их «устройство», остается неизвестным. Точнее, ИНС остаются логически непрозрачными. Именно поэтому в литературе последних лет все чаще делается акцент на преодолении логической непрозрачности нейронных сетей (в англоязычной литературе используется термин «Explainable Neural Networks» [34,35]).

Актуальность такого направления исследований не вызывает сомнений. Системы искусственного интеллекта, которые более чем часто строятся именно на основе ИНС, все более широко используются для управления различными процессами, в том числе и в критических важных областях, например, связанных с обеспечением безопасности. Использовать для подобной цели систему, которая функционирует в соответствии с неизвестным алгоритмом, мягко говоря, не всегда целесообразно. Отметим, что проблеме преодоления логической непрозрачности систем искусственного интеллекта также посвящена обширная литература [36-38].

Аналогия с интеллектом человека очевидна. Это – тоже нейронная сеть, которая функционирует в соответствии с неустановленным алгоритмом. Установить реальные законы мышления – это значит, раскрыть такие алгоритмы, причем это можно сделать экспериментальным путем, например, отталкиваясь от того массива данных, который сейчас хранит Интернет.

Отметим, что методология изучения систем неизвестного устройства хорошо известна. В ее основе лежит термин «черный ящик» [39]. И ИНС, и интеллект человека с этой точки зрения можно рассматривать как «черный ящик», реальное устройство которого (нейрофизиологические процессы) остается неизвестным.

Однако, его алгоритм можно реконструировать, имея массив данных, отражающих его реакцию на внешние воздействия. В частности, применительно к сверточным ИНС такую дешифровку можно проводить уже сейчас, опираясь на цифровой аналог теоремы о свертке [40].

Напомним, что эквивалентную радиоэлектронную схему любой линейной системы, осуществляющей обработку сигналов, зависящих от времени, и обладающей свойством инвариантности относительно сдвига по времени, можно установить на основе анализа ее амплитудно-частотной характеристики, пользуясь классической теоремой о свертке. Полностью аналогичным образом логика сверточной нейросети дешифруется на основе цифровой теоремы о свертке, если имеется достаточный массив данных, к которому каждому набору значений, характеризующих состояние входов ИНС ставится в соответствие набор данных, характеризующих состояние выходов.

Разумеется, это – не более чем один из многих возможных вариантов. Но, какой бы конкретно алгоритм бы не использовался для дешифровки алгоритмов ИНС или установления законов мышления, это потребует создания нетривиальных подходов к обработке экспериментальных данных, чему и посвящена данная монография.

Однако, прежде чем переходить к рассмотрению конкретных вопросов, остановимся на еще одном аспекте проблемы установления сущности мышления, представляющем несомненный практический интерес.

## **2. Проблема сущности мышления и интеллекта с точки зрения концепции цифрового бессмертия**

В настоящее время имеются все предпосылки для того, чтобы перевести идеи, выражаемые тезисом о цифровом бессмертии в сугубо практическую плоскость. Как минимум речь идет о такой составляющей личности как интеллект. Подчеркнем, что структура личности является весьма сложной. (Помимо цитированных выше работ, в этом отношении можно также указать на публикацию [41]). Различные психологические школы трактуют ее по-разному, но не вызывает сомнений, что понятия «интеллект», «разум» и «сознание» не являются тождественными.

Интеллект, в соответствии с результатами работ [21,23] следует трактовать, в первую очередь, как систему переработки информации, причем именно эта составляющая структуры личности является наиболее простой с точки зрения создания технологий, обеспечивающих перенесение на небиологический носитель информации.

Это связано с тем, что интеллект оперирует представлениями («знаками»), допускающими последовательную формализацию уже на данном этапе исследований. В первую очередь, к таким «знакам» относятся слова естественного языка, искусственно формируемые термины и символы (например, математические) и т.д. Правила оперирования этим знаками, могут быть раскрыты на эмпирической основе, о чем и говорилось в предыдущем параграфе.

С этой точки зрения, обеспечение переноса данной составляющей структуры личности на небиологический носитель информации сводится к вопросу о реконструкции алгоритмов, в соответствии с которыми оперирует интеллект.

Подчеркиваем, что речь на данном этапе идет только об отдельной структуре личности, которая преимущественно связана с профессиональной или иной формой деятельности, поддающейся алгоритмизации.

Это, конечно, не является обеспечением цифрового бессмертия в полной мере, но представляет собой значимый шаг в данном направлении, демонстрирующий вполне осязаемый успех, способный стимулировать всплеск интереса исследователей к рассматриваемой проблематике.

Данный успех в первую очередь может быть основан на преодолении тезиса о логической непрозрачности нейронных сетей (в англоязычной литературе для обозначения нейросетей, чей алгоритм работы является логически прозрачным, используется термин «explainable neural networks», как это подчеркивалось выше). Существенный шаг в данном направлении был сделан в работах [42,43], в которых было показано, что алгоритмическая основа функционирования нейронных сетей может быть раскрыта методами проективной геометрии.

Рассмотрим более подробно тот класс нейросетей (сверточные нейросети [44,45]), алгоритм работы которых становится полностью прозрачным, в том числе, благодаря результатам, полученным в работах [40,46].

Традиционно сферой применения сверточных нейронных сетей является распознавание образов, компьютерное зрение, т.е. область развития искусственных нейронных сетей (ИНС) и искусственного интеллекта (ИИ), которая сейчас находит все более широкое применение [47-49]. Подчеркнем, что в литературе [50,51] встречаются также доказательства эффективности их применения и для обработки текстов на естественном языке (NLP), хотя в данной области ранее преимущественно использовались рекуррентные нейронные сети. Важной областью применения сверточных нейронных сетей является выделение и распознавание речи в зашумленных условиях [52].

Покажем, что именно сверточные нейронные сети позволяют сделать первый – и решающий – шаг в части преодоления тезиса о логической непрозрачности нейронных сетей.

Традиционные подходы к синтезу нейросетей действительно позволяют трактовать их как «черный ящик» [39]. Данный термин уже более чем продолжительное время используется в теории информации для обозначения системы, устройство которой остается неизвестным, но которое может быть изучено на основе массива данных, связывающих сигналы на входе с сигналами на выходе.

В современной нейронауке хорошо отработаны многочисленные алгоритмы обучения нейронных сетей, т.е. алгоритмы, позволяющие получить нечто вполне работоспособное, но они не позволяют вскрыть алгоритм, которым оперирует обученная нейронная сеть. Мы, человечество, знаем, как построить нейронную сеть, но, строго говоря, далеко не всегда знаем, как именно она работает. Несколько утрируя, здесь ситуация примерно та же, что с рождением ребенка: все прекрасно знают, что надо сделать, чтобы его зачать, но мало кто возьмётся прогнозировать что именно ребенок станет делать, когда вырастет.

Именно это обстоятельство и заставило исследователей обратить самое пристальное внимание на вопрос о логической прозрачности нейронных сетей, упоминавшийся выше. Этот вопрос становится еще более актуальным в связи с проблематикой искусственного интеллекта [36-38].

Действительно, системы искусственного интеллекта, построенные, главным образом, на обученных нейронных сетях, все чаще используются в том числе и в критически важных областях деятельности. Поручать принятие ответственных решений, которая функционирует на основе неизвестных алгоритмов, мягко говоря, не вполне разумно, что и возвращает к вопросу о истинных алгоритмах функционирования нейросетей. Подчеркнем, что последние не просто часто остаются неизвестными. В популярных ресурсах все чаще встречаются тексты, в которых нейронные сети противопоставляются программам с явно прописанными алгоритмами, что подчеркивает остроту рассматриваемой проблемы в том числе и с методологической точки зрения.

Для решения проблемы логической прозрачности нейросетей можно предложить, как минимум, два подхода. Первый из них представлен, в частности, цитируемыми выше работами [42,43], в которых было показано, что алгоритм работы произвольной нейронной сети с пороговой функцией

активации нейронов может быть сведен к логическим операциям, причем множество операций, реально выполняемых отдельным нейроном, является ограниченным в соответствии с доказанными в цитированных работах теоремами.

Этот метод можно назвать методом деконструкции нейросети. Отталкиваясь от известной матрицы весовых коэффициентов, и пользуясь, например, методами проективной геометрии, можно установить логические операции, выполняемые нейросетью и, следовательно, реконструировать алгоритм ее работы.

Этот метод является далеко не единственно возможным. В частности, нейронную сеть допустимо рассматривать как «черный ящик». Рассмотрим метод деконструкции алгоритма его работы на примере упомянутых выше сверточных нейронных сетей.

Такие нейронные сети, что отражено в их названии, выполняют операцию свертки. Такая операция является фундаментальной для всей современной радиотехники (шире – для теории линейных систем произвольной природы).

А именно, отклик любой линейной системы, обладающей свойством инвариантности относительно операции сдвига по времени, описывается операцией свертки

$$f_{out}(t) = f_{in} \otimes G = \int f_{in}(t_1)G(t - t_1)dt_1 \quad (2.1)$$

где  $f_{out}$  и  $f_{in}$  – сигналы на выходе и входе системы, соответственно,  $G$  – ядро оператора свертки.

Тот факт, что любая система указанного выше типа действительно описывается операцией вида (2.1), вытекает из следующих обстоятельств. Коль скоро выполняется свойство линейности, то отклик системы на произвольное внешнее воздействие может рассматриваться как суперпозиция откликов на некие эталонные сигналы, применяемые, говоря упрощенно, для тестирования системы.

Для теоретического описания в качестве такого эталонного сигнала можно использовать  $\delta$ -функцию Дирака, представляющую собой следующую идеализацию. Данная функция отлична от нуля только в одной точке  $t = 0$ , а интеграл от этой функции, взятый в бесконечных пределах, равен единице. Упрощая, данную функцию можно трактовать как бесконечно короткий импульс. С этой точки зрения формула (2.1) описывает работу системы как отклик на суперпозицию таких бесконечно коротких импульсов. При этом принимается во внимание, что отклик на любой из таких импульсов, отличающихся сдвигом по оси времени, будет одинаков. Точнее, отклик на рассматриваемый импульс со сдвигом по времени также будет отличаться от исходного точно таким же сдвигом. Данный факт отражает свойство симметрии системы относительно операции сдвига по времени.

Отметим, что таким свойством заведомо обладает любая радиоэлектронная схема, собранная из типовых компонент (таких как

конденсаторы, резисторы и сопротивления). Номиналы всех этих компонент не зависят от времени, что гарантирует свойство инвариантности относительно сдвига по времени, использованное при выводе формулы (2.1).

К соотношению вида (2.1) применима теорема о свертке, которая утверждает, что Фурье-образ свертки есть произведение Фурье-образов функций, стоящих под ее знаком

$$F[G \otimes f] = \int G(t_2) e^{-i\omega t_2} dt_2 \int f(t_1) e^{-i\omega t_1} dt_1 = F[G]F[f] \quad (2.2)$$

где через  $F[f]$  обозначена операция выполнения Фурье-преобразования функции  $f$ ,  $\omega$  – круговая частота.

Данная теорема позволяет выполнить реконструкцию любого «черного ящика», обладающего свойствами линейности и инвариантности относительно операции сдвига по времени.

Действительно, как вытекает из соотношения (2.2), такие системы исчерпывающе описываются их амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), регистрируемой с учетом фазы тестирующего сигнала, что широко известно в теоретической радиотехнике. АЧХ, регистрируемая с учетом фазы сигнала и есть Фурье-преобразование ядра операции свертки, фигурирующего в формулах (2.1) и (2.2).

$$A(\omega) = \int G(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.3)$$

Исчерпывающее описание через АЧХ достигается тем, что существует возможность предсказать реакцию на любой внешний сигнал, если известна функция (2.3), как это вытекает из базового соотношения (2.2). При этом саму АЧХ можно зарегистрировать, используя стандартизованные тестовые сигналы (гармонические), что уже более полувека реализуется, в том числе, специальной аппаратурой (анализаторы АЧХ).

Для целей данной работы, однако, гораздо более существенно, что «начинка» черного ящика, с известной АЧХ может быть восстановлена и без детального исследования его устройства. Для этого достаточно собрать (в том числе, и виртуально, т.е. средствами имитационного моделирования) радиоэлектронную схему, состоящую из резисторов, конденсаторов и сопротивлений, которая будет обладать той же самой АЧХ (в пределах допуска).

Результаты работ [40,46], как отмечалось выше позволяют провести полностью аналогичную процедуру и по отношению к сверточным нейронным сетям. А именно, в работе [40] на основе методики, предложенной в [46] был доказан цифровой аналог теоремы о свертке. Это становится возможным за счет использования полей Галуа для представления моделей сигнала. В этой связи уместно подчеркнуть, что функции действительного переменного, широко используемые в приложениях, в том числе и в радиотехнике, представляют собой не более чем модель сигнала. Реальному физическому процессу в соответствие ставится математический объект.

Строго говоря, выбор такого объекта диктуется только вопросом удобства. В частности, как показано в [46], для цифровой обработки дискретных сигналов, изменяющихся в конечном диапазоне амплитуд, целесообразно использовать функции, принимающие значения в полях Галуа. Данные поля, по определению, представляют собой конечные коммутативные алгебраические тела. Соответственно, каждому уровню из конечного дискретного набора в соответствии с [46] ставится в соответствие определенный элемент поля Галуа.

Как показано в [40], такой подход позволяет доказать «цифровую» теорему о свертке, применимую в том числе для анализа сверточных нейронных сетей в том же ключе, в котором аппарат передаточных функций (АЧХ) используется для анализа линейных систем произвольной природы.

Действительно, операция осуществляемая сверточной нейронной сетью, используемой, скажем, для анализа изображений, в аналоговой форме представляет как

$$U_{out}(x_1, y_1) = \int K(x_0, y_0) U_{in}(x_1 - x_0, y_1 - y_0) dx_0 dy_0 \quad (2.4)$$

где  $U_{out}(x, y)$  и  $U_{in}(x, y)$  – функции, описывающие непрерывные распределения интенсивности для выходного и входного изображений,  $K(x, y)$  – ядро операции свертки.

Применительно к нейронным сетям данная формула записывается в форме

$$U_{out}(j_x, j_y) = \sum_{i_x, i_y} K(j_x, j_y) U_{in}(i_x - j_x, i_y - j_y) \quad (2.5)$$

где  $U_{out}(j_x, j_y)$  и  $U_{in}(i_x, i_y)$  – матрицы входных и выходных сигналов, соответственно,  $j_x, j_y$  и  $i_x, i_y$  – индексы, нумерующие элементы этих матриц,  $K(j_x, j_y)$  – матрица ядра оператора свертки.

К формуле (2.4) также применима теорема о свертке, а к формуле (2.5) – ее цифровой аналог, доказанный в работе [40].

Таким образом, существует вполне определенный класс нейростей, который уже на данном этапе исследований может рассматриваться как полностью логически прозрачный.

Разумеется, он далеко не исчерпывает всех возможных вариантов нейросетей, а тем более нет никаких оснований полагать, что этот класс имеет то или иное отношение к биологическим нейронным сетям, однако, рассмотренный пример наглядно демонстрирует отстаиваемый нами базовый тезис.

Для реконструкции (шире – переноса на небиологический носитель) той части структуры личности, которая именуется интеллектом, необходимо иметь массив данных, связывающих «вход» и «выход». Реконструкция на основе данных, отражающих только лишь поведение человека, заведомо не является достаточной. В лучшем случае, нейросеть, ориентированная на такие данные, сможет создать лишь некую имитацию (кстати, эту задачу уже решают

некоторые компьютерные программы, например, имитирующие поздравления от уже умершего человека).

Такое положение дел связано с фундаментальными свойствами любой системы переработки информации, частным случаем которой является интеллект человека. Чтобы перенести пусть даже и отдельную компоненту структуры личности на небиологический носитель, нужно установить, как минимум соответствующий алгоритм.

Разумеется, при переходе к переносу более глубоких компонент личности на небиологический носитель придется использовать более сложные информационные структуры нежели те, что характеризуются термином «алгоритм» (иерархия таких структур с точки зрения диалектики информации рассматривалась выше). Но, рассмотрение данных вопросов выходит за рамки настоящей монографии, задачей которой является преимущественно постановка проблемы и демонстрация возможности ее решения.

В частности, из самых общих соображений вытекает, что связь «вход – выход», необходимая для реализации концепции цифрового бессмертия по крайней мере в первом приближении, позволит кардинальным образом изменить положение дел в сфере высшего образования.

В этом действительно имеется острая необходимость.

Кризис современной высшей школы анализировался во многих работах, в частности, в [53,54]. Он заведомо носит многогранный характер. Однако можно выделить и центральную проблему, которая имеет непосредственное отношение к целям данной работы – мотивацию обучающихся. Любые инновационные методики обучения, любые административные мероприятия заведомо окажутся бесполезными, если студенты не будут мотивированы на получение реальных знаний. Именно в этом убеждает ситуация, сложившаяся, в том числе, в Казахстане.

Значительная масса студентов мотивирована на получение формальных свидетельств квалификации, а те, кто хочет получить реальные знания, ориентируются, главным образом, на самообразование, и общедоступные Интернет-ресурсы предоставляют им для этого все возможности. Кризис усугубляется наличием большого числа псевдоученых и псевдопедагогов в университетах [55-57].

Такое положение дел отнюдь не является следствием только лишь процессов, развивающихся казахстанской высшей школе. По большей части, это – следствие процессов, протекающих в экономике. Как отмечалось в работе [58], высшее образование в Казахстане давно стало массовым, причем имеют место выраженные структурные диспропорции. На рынке труда де-факто востребованы специалисты или достаточно высокой, или низкой квалификации, тогда как университеты – в силу социальной инерции – преимущественно готовят специалистов среднего уровня.

Неудивительно, что оплата труда даже трудоустроенных выпускников оказывается сопоставимой с оплатой труда не только бухгалтеров, закончивших краткосрочные курсы, но даже и с оплатой труда домработниц в зажиточных



семьях, уже не говоря о том, что значительная часть выпускников университетов работает не по специальности.

Высшая школа в Казахстане, если говорить с точки зрения экономики, де-факто представляет собой некий симулякр занятости. Созданы рабочие места для педагогов, причем их реальная квалификация в лучшем случае является вторичной, молодежь также имеет некое занятие.

При этом, однако, остается неиспользованным важнейший ресурс – исторически сложившееся представление о том, что высшее образование может предоставить некие преференции.

Соответствующие концепты очень глубоко укоренены в общественном мнении, что не требует развёрнутых доказательств – практически все казахстанские родители так или иначе стремятся дать своим детям «высшее образование» даже в условиях, когда многие из них понимают, что оно во многом уже конвертировалось в симулякр.

Данный ресурс вполне может быть конвертирован в экономические успехи, в частности, через создание среды, ориентированной на творчество, на создание молодежных стартаповских компаний и т.д. [59,60]. Для этой цели созданы самые различные стимулирующие инструменты, проводятся различные конкурсы и т.д., но не решается главная проблема – мотивация обучающихся на получение реальных знаний. Крайне сложно разъяснить студенту, зачем нужно тратить долгие годы на приобретение реальной квалификации, если это не сулит тех или иных преференций. Истинное положение педагогов университетов на социальной лестнице убеждает их в обратном – в том, что от получения знаний нет никакого прока.

Ситуацию можно переломить именно за счет использования тезиса о цифровом бессмертии.

Инстинкт самосохранения, выражающийся в страхе смерти, присущ подавляющему большинству людей, и чем выше уровень благосостояния, тем более этот страх выражен.

Есть все основания полагать, что стремление многих блогеров запечатлеть свой образ в телекоммуникационной сети есть некая форма преодоления этого страха, в совокупности с надеждой, что их личность, по крайней мере частично, когда-нибудь в отделенном будущем может быть восстановлена. Впрочем, не исключено, что превращенной формой этого страха является и стремление многих публичных (и не только) фигур оставить свой след в истории.

Цифровые технологии уже сделали очень и очень много, чтобы позволить многим пользователям Интернета оставить такой след (насколько это удачно – отдельный вопрос). Но, как было продемонстрировано выше на частном примере сверточных нейросетей, сам по себе этот «след» не решает ничего, во всяком случае на достигнутом уровне понимания сущности интеллекта. Необходима жесткая связь между «сигналами на входе» и «сигналами на выходе».

Наиболее естественной площадкой для получения соответствующего массива данных является именно образование, точнее, те процессы, заведомым участником которых является любой студент.

Действительно, с точки зрения, отстаиваемой в работах [61,62], обучение есть вполне определенное информационное воздействие на интеллект студента. И само это воздействие, и отклик на него вполне можно отследить, особенно в условиях, когда образование становится дистанционным.

Нет никаких оснований полагать, что карантинные мероприятия непременно не будут применены снова в обозримом будущем, кроме того, сама логика развития высшей школы, ориентированная на постепенное внедрение систем искусственного интеллекта, говорит о том, что технологии, отработанные в период пандемии, будут использоваться и далее.

В таких условиях уже сохраняется (или способен быть сохраненным) некий массив данных, достаточный для последующего восстановления по крайней мере некоторых компонент личности на небиологическом носителе.

В первую очередь это касается использования интеллекта в высшей школе. Этот вопрос становится все более актуальным, в том числе, в силу сугубо экономических причин.

Действительно, в условиях, когда высшее образование давно и необратимо стало массовым, крайне сложно обеспечить педагогам то положение на социальной лестнице, которое они занимали в период расцвета классических университетов (на рубеже XIX и XX веков [63]), это потребует от общества чрезвычайно высоких затрат. Очевидным выходом из положения является ориентация на использование систем искусственного интеллекта. Такие системы уже создаются, но их эффективность пока остается под вопросом. Более того, в экспертном сообществе активно дискутируется вопрос о том, а могут ли искусственные системы заменить педагога.

С точки зрения тезиса о цифровом бессмертии эта дилемма разрешается неожиданным образом. Системы искусственного интеллекта, применяемые в высшей школе, вовсе не обязательно должны быть искусственными в полном смысле этого слова. Они могут представлять собой и «цифровой слепок» конкретных педагогов, точнее их интеллекта, причем как показано выше, все предпосылки для создания соответствующих технологий имеются уже сейчас.

Но, эти технологии могут быть задействованы только в режиме «воздействие – отклик». Следовательно, цифровую копию интеллекта целесообразно создавать уже со студенческой скамьи, накапливая соответствующий массив данных в течение многих лет.

Это автоматически создает вполне определенную мотивацию к учебе по крайней мере у той достаточно обширной категории людей, для которых посмертный след в истории представляет определенную ценность.

Разумеется, тот «цифровой слепок», который можно сделать, раскрывая первый слой структуры личности, отнюдь не означает цифрового бессмертия в полной мере, т.е. не означает, что такой «слепок» педагога будет осознавать свое «Я» и т.д. Это только первый шаг – создание системы, которая будет учить студентов близко к тому, как учил бы их конкретный педагог, ушедший в мир иной.

Но, даже этот ограниченный первый шаг, вселяя определенные надежды, способен оказать существенное влияние на мотивацию к приобретению реальных знаний.

Таким образом, цифровое бессмертие уже становится реальностью, причем эта реальность естественным образом ориентирована на сферу образования. «Цифровой слепок» личности проще всего делать в процессе ее становления, тем более что соответствующие технологии естественным образом вписываются в логику всего того корпуса технических решений, который отвечает переходу на дистанционное образование и использование систем искусственного интеллекта в высшей школе.

Процесс получения знаний в высшей школе, в результате приобретает двоякий характер, выдвигая на первый план именно тех людей, стремления которых в корне отличаются от обывательских. Эти люди приобретают реальную возможность, выраженную словами великого Горация: *«Нет, я не весь умру...»*. Для них автоматически формируется весьма нетривиальная мотивация к получению реальных знаний, что может быть использовано для кардинального повышения эффективности высшего образования, в чем имеется насущная необходимость.

Более того, реальность обеспечения цифрового бессмертия действительно делает остро необходимыми новые подходы к обработке данных, причем самых различных (разноплановых). Это возвращает к вопросу о многозначных логиках, который в следующей главе рассматривается в ракурсе, также имеющем прямое отношение к проблеме сущности мышления.

### **3. Коллективная составляющая интеллекта и многозначные логики**

Как отмечалось выше, дальнейшее развитие систем искусственного интеллекта, что уже ни у кого не вызывает сомнений, ставит и будет ставить перед «технарями» вопросы, которые ранее преимущественно находились в компетенции социально-гуманитарных наук. Основным из них, очевидно, является вопрос о сущности интеллекта как такового, без ответа на который все дискуссии о том, можно ли считать данную конкретную систему искусственным интеллектом или нет, становятся беспредметными.

Более того, бурное развитие систем искусственного интеллекта, в том числе, высвечивает и неожиданные грани старых проблем. В частности, есть все основания утверждать, что тот социальный феномен, который именуется бюрократией, и есть «система искусственного интеллекта», возникшая эволюционным путем [64].

Наглядно пояснить сказанное можно на примере, приведенном в работах [30,65], в которых рассматривалась процедура голосования в некотором Совете (например, диссертационном). Было показано, что взаимное влияние членов Совета друг на друга (так, может быть подан голос «против» хорошей диссертации, если ее защищает ученик конкурента или недруга) приводит к тому, что схема Совета топологически становится эквивалентной нейронной сети Хопфилда. Следовательно, при условии, когда плотность связей указанного выше типа становится достаточно высокой, то решение де-факто принимает не совокупность членов Совета, но сформированный ими аналог нейронной сети. Аналогичные процессы информационной самоорганизации протекают и при выработке других управленческих (административных) решений, вследствие чего можно утверждать, что очень часто решение принимается некими надличностными информационными системами, природа которых пока что остается малоизученной.

Данный пример показывает, что в вопросе о системах искусственного интеллекта конкретная элементная база, на которой она реализуется технически, вторична. Обыденные вычисления в десятичной системе счисления могут осуществляться на бумаге, при помощи старозаветных счет с деревянными костяшками, посредством арифмометра или калькулятора. Основой счета как такового в любом из этих случаев является информация более высокого порядка, нежели та, с которой оперирует данное конкретное вычислительное устройство. Это – правила сложения десятичных чисел, которые технически могут быть реализованы любым образом.

Иначе говоря, сущность систем искусственного интеллекта определяется отнюдь не конкретной формой технической реализации. Она определяется, главным образом, теми алгоритмами, которые положены в ее операциональную основу. Впрочем, термин «алгоритм» имеет вполне определенный смысл. Более корректно, следует говорить о вполне определенной иерархии информационных объектов, рассмотренной в главе 1.

Низшее положение в ней занимает «просто информация», скажем, сообщение, количество информации в котором может быть непосредственно

измерено по формуле Шеннона. Правила сложения двоичных и/или десятичных чисел занимают более высокую ступень. Действительно, эти правила также представляют собой сугубо информационный объект. Например, их можно зафиксировать на бумаге и так же вычислить количество содержащейся в таких записях информации. Однако, полученное значение количества информации не будут в полной мере отражать сути дела: с помощью указанных правил можно получать, вообще говоря, бесконечно большие объемы новой информации, что и осуществляется на практике при проведении вычислений по указанным правилам.

С этой точки зрения, то, что именуется интеллектом, есть особым образом структурированная и приобретающая относительную самостоятельность информация. Она также может быть реализована на любой элементной базе, в частности, из администраторов. Природа носителя информации действительно является вторичной. Подчеркнем, что такая трактовка бюрократии, в сущности, полностью согласуется с точкой зрения Вебера [66], полагавшим, что идеальная административная система должна представлять собой программно-аппаратный комплекс (если выражаться современным языком), действия чиновников в которой строго регламентированы (что подразумевает полное исключение «человеческого фактора»).

Иное дело, что в природе нет ничего идеального, и в административных системах активно шли и продолжают идти процессы информационной самоорганизации, которые и порождают, в частности, феномен бюрократии, обусловленный возникновением горизонтальных или паразитных информационных связей между чиновниками [67].

Отметим, что рассматриваемый вопрос об информационной самоорганизации и самопроизвольном возникновении информационных объектов более высоких уровней иерархии (в смысле указанном в главе 1) представляет собой де-факто общенаучный интерес, точнее именно этот вопрос и может быть положен в основу последовательного естественнонаучного доказательства принципа глобального эволюционизма. В частности, феномен Живого, что отмечалось еще в [68], также может рассматриваться с сугубо информационной точки зрения.

Феномен Жизни неотделим от процессов сохранения и самовоспроизводства генетической информации. Как известно, наиболее надёжный способ для максимально длительного сохранения информации состоит не в том, чтобы обеспечить максимально прочный и устойчивый к влияниям внешней среды носитель, но в том, чтобы обеспечить ее многократное тиражирование с «размножением носителей». В этом смысле наиболее показательными являются объекты, занимающие промежуточное положение между живой и неживой материей – вирусы – функционирование которых подчинено единственной задаче – сохранению информации, содержащейся в биологической информационной макромолекуле, которая, собственно, и формирует вирус. Следовательно, изучение процессов информационной самоорганизации в средах, содержащих макромолекулярные объекты,

способные тиражировать информацию, представляет, в том числе значительный интерес и с точки зрения до сих пор нерешенной проблемы – установления механизмов эволюции, предшествовавшей биологической.

Весьма выраженными процессы информационной самоорганизации становятся в телекоммуникационных средах, вплоть до того, что в настоящее время уже ставится вопрос о возникновении «спонтанного интеллекта» в телекоммуникационных сетях [69].

Наивно предполагать, что процессы самоорганизации в коммуникационном пространстве есть нечто абстрактное, предмет умствования рафинированных интеллектуалов. Эти процессы – точно так же, как это можно видеть на примере бюрократии – в состоянии подчинить себе даже политические элиты, что отчасти уже видно на примере «бешенства информационных потоков», составляющего одну из граней эпидемиологического кризиса 2020 года.

Таким образом, проблема сущности интеллекта и протоинтеллекта, т.е. тех информационных систем, из которых развился интеллект человека в ходе эволюции, приобретают далеко не только технический интерес. Как подчеркивалось, в том числе, в [70], вектор развития систем искусственного интеллекта во многом способен определить и вектор развития общества: при пессимистическом сценарии искусственный интеллект способен стать еще одним средством оглушения народов и их подчинения, при оптимистическом – служить инструментом укрепления суверенитета личности.

Данный вывод обуславливает актуальность разработки математических моделей и логических систем, позволяющих раскрывать неожиданные стороны коллективной человеческой деятельности.

Отправной точкой рассуждений являются выводы, сделанные в работах [25-27] о существовании надличностного уровня переработки информации и надличностных информационных объектов. Иначе, мозг каждого из индивидов, строго говоря, не является полностью независимой системой переработки информации. Он интегрирован в системы более высоких порядков, каждая из которых является частью (или структурным элементом) ноосферы, понимаемой по В.И. Вернадскому.

Уместно подчеркнуть, что в последние десятилетия отношение к идеям В.И. Вернадского в экспертном сообществе оставалось неоднозначным. Многие видели за тезисами о ноосфере не более чем некие метафоры, если не попытку идеализировать представления о развитии человечества.

Цитированные выше работы [25-27], однако, позволяют утверждать, что вопреки такого рода точкам зрения, ноосфера представляет собой объективно существующую физическую реальность, природа которой самым тесным образом связана с тем, что и именуется медиапространством или коммуникационной средой.

Доказать это, можно и не прибегая к детальным математическим выкладкам (они представлены в работе [28]).

Современная нейрофизиология однозначно говорит о том, что такие информационные сущности как интеллект, разум и сознание человека возникают вследствие обмена сигналами между нервными клетками – нейронами – входящими в состав головного мозга.

Более того, любое общение между индивидами, де-факто также сводится к обмену сигналами между нейронами, входящими в состав головного мозга собеседников. Принято считать, что индивиды обмениваются информацией, но в действительности это является приближением, причем весьма грубым. Информация не может передаваться без носителя (в качестве такового и выступают физические процессы, определяющие обмен сигналами между нейронами).

Как вытекает из современных исследований в области теории нейронных сетей, их операциональные возможности нелинейно зависят от числа нейронов. Упрощая, нейронная сеть, составленная из двух одинаковых подсетей, будет не в два, а более чем в два раза эффективнее, нежели каждая из этих подсетей по отдельности (во всяком случае, данное утверждение справедливо для нейронных сетей, обладающих распределенной памятью [28]).

Следовательно, в тот момент, когда в результате общения между индивидами возникает общая нейронная сеть, то возникает и некое новое качество – новый «сегмент» общей памяти, куда может быть записана информация, только косвенно связанная с той, что хранит память индивидов.

Это и есть надличностный уровень переработки информации, на котором развиваются различного рода надличностные информационные объекты.

Парадоксально, но примеры такого рода надличностных информационных объектов хорошо известны. К ним, в частности, относится любой из естественных языков, существующих на нашей планете. Действительно, язык, как системная целостность, только частично хранится в памяти индивидов, целостностью он становится только на надличностном уровне переработки информации.

Вывод о существовании надличностных информационных структур (объектов) позволяет также дать последовательное истолкование таким понятиям как менталитет и коллективное бессознательное (понимаемое в смысле Юнга). С нашей точки зрения коллективное бессознательное представляет собой одну из подсистем надличностного уровня переработки информации, каковых существует достаточно много. Информационные объекты, ассоциированные с этой подсистемой также хорошо известны, это, например, архетипы, а также другие проявления всего того, что связано с мифологичностью сознания людей.

Более корректно следует говорить, что сознание, интеллект и разум человека в действительности имеют двойственную природу, в них одновременно присутствует и коллективное, и индивидуальное начало. При этом коллективная составляющая разума, сознания (подсознания) и т.д. представляют собой своего рода проекцию надличностных информационных структур на относительно самостоятельный фрагмент ноосферы, локализованный в пределах головного мозга индивида.

Таким образом, уже можно считать доказанной несостоятельность точек зрения на различия «машинного» и человеческого интеллекта, так или иначе связанных с тестом Тьюринга. Как минимум, данный тест не учитывает коллективной составляющей интеллекта, а кроме того, он не позволяет принимать во внимание эволюцию интеллекта, которая, как подчеркивалось в [27], протекает в режиме реального времени, причем конвертация общества в человеко-машинную систему вследствие бурного развития телекоммуникационной индустрии многократно ускоряет данный процесс.

Других критериев различий между «машинным интеллектом» и интеллектом в полном смысле этого слова, конечно, можно предложить достаточно много, но для практического использования все же нужно осуществить определенный выбор.

Мы исходим из того, что принципиальным отличием интеллекта человека от условно «машинного» (в том не вполне определенном смысле, в котором этот термин использовался и используется в дискуссиях на тему «способна ли машина мыслить») является *способность осознанно и целенаправленно лгать*.

Подчеркиваем, что данное утверждение не предусматривает обязательную негативную коннотацию; в сущности, именно способность лгать и лежит в основе того, что именуется творчеством. Любое художественное литературное произведение есть вымысел, т.е. с сугубо формальной точки зрения – ложь; человек, именуемый Евгением Онегиным, никогда не жил в реальном Санкт-Петербурге.

Вероятно, нет необходимости развернуто доказывать, что одни и те же механизмы функционирования интеллекта отвечают и за творчество, и за сознательный обман ближнего.

Конструирование математической модели реального физического процесса – это такой же акт творчества как сочинение романа или сказки. Генерируется некий идеализированный конструкт, плод фантазии. Эта картина только потом соотносится с реальностью, причем трактовка термина «реальность» в этом предложении более чем вариативна. Так, применительно к литературному творчеству принято говорить о художественной правде. Модель физического явления может быть вполне работоспособной даже тогда, когда выясняется, что ее природа вообще никакого отношения к действительности не имеет.

Грань между ложью и фантазией очень зыбка, по существу, она лежит только в этической плоскости. Литератор может писать о переживаниях и поступках выдуманных персонажей в благих целях, коррупционер, прикрываящий свои действия некими правдоподобными измышлениями, – наоборот. Более того, мифологичность мышления, присущая человеку (в особенности – современному), говорит о том, что «вымысел может стать правдой».

Точнее, в соответствии с современными воззрениями миф (в особенности мифы древних культурных народов, например, древнегреческие) отнюдь не следует трактовать как некую разновидность вымысла. Миф являлся (во многом



является и сейчас) средством рефлексии действительности. Именно посредством мифа, например, в эпоху классической Греции или Древнего Египта человек упорядочивал свое видение окружающей действительности. Миф регламентировал его жизнедеятельность, придавал целостность обществу и т.д. Фактически миф выполнял те функции, которые позже стали выполнять религия, наука и право – все эти области человеческой деятельности порождены мифологической картиной мира, которая со временем перестала удовлетворять потребностям общества.

Иначе говоря, на определенном этапе развития общества миф был практически полезным, но эта полезность не имела никакого отношения к категории Истины в современном ее понимании. Здесь уместно отметить, что как показано в работах Mircea Eliade [71], мифологический способ восприятия действительности встречается и в современную эпоху, причем гораздо более часто, нежели это может показаться на первый взгляд.

С рассматриваемой точки зрения это означает, что мышлению человека изначально отнюдь не присущи представления об истине – во всяком случае в современной трактовке этого понятия. Интеллект человека, строго говоря, оперирует совсем другими конструкциями, к которым истинность имеет только косвенное отношение. Тот аппарат формальной логики, который восходит к Аристотелю, есть позднейшее изобретение, что, в частности, показывают исследования Lévy-Bruhl, L. [24], в которых был сделан вывод о том, что в примитивных культурах отсутствовало логическое мышление как таковое.

С рассматриваемой точки зрения мифологическая картина мира представляет собой информационную структуру, порожденную коллективной составляющей сознания и разума, точнее это – преломление на том языке, который доступен индивиду, тех информационных процессов, которые протекают на надличностном уровне переработки информации.

Не только архетипы, но и Древние Боги представляют собой некие отражения надличностных информационных объектов, эволюция которых только постепенно привела к появлению разума, в котором индивидуальная составляющая стала достаточно выраженной. На уровне логического мышления, которое развилось только достаточно поздно, воспринять такого рода объекты заведомо невозможно, поэтому столь важное значение во всех культурах играет миф, неотделимый от творчества, а, следовательно, и от вымысла.

Остается подчеркнуть, что простейшим актом творчества является прямой и незатейливый обман одного человека другим.

Парадоксально, но вопрос «может ли машина мыслить?» исходя из высказанных выше соображений следует переформулировать – может ли машина целенаправленно солгать?

Данный вопрос в сложившихся условиях имеет и сугубо прикладное звучание. Никто не знает, можем ли мы считать «спонтанный» искусственный интеллект, порожденный обменом информацией в телекоммуникационной среде состоявшимся, или же пока можно говорить только о протоинтеллекте. Существующие взгляды на эволюцию сложных систем (их обзор дан в [72]),

однако, позволяют утверждать, что грань между спонтанным поведением неразумной системы, обеспечивающим ее самовоспроизводство и осознанным целеполаганием (грань между «инстинктом» и осознанным поведением) является диффузной.

Соответственно поведение даже протоинтеллекта, порожденного телекоммуникационными средами, может идти вразрез с интересами тех, кто создает и эксплуатирует эти среды, что возвращает к тезисам работы [70]. Информационная стихия вполне может выйти из-под контроля и ситуация, возникшая в коммуникационном пространстве под воздействием эпидемиологического кризиса 2020-2021 гг. прямое тому доказательство, подчеркнем это еще раз.

Глобальная информационная среда может в обыденном понимании лгать (например, генерировать и поддерживать устойчивость фейков) не потому, что она лелеет некие коварные замыслы, но потому, что она подчиняется определенным плохо изученным закономерностям, отражающим коллективное поведение сложных систем. Рассмотренный выше пример бюрократии как системы искусственного интеллекта, собранной на «людской» элементной базе, убеждает, что такого рода суждения отнюдь не выглядят гипотетическими.

Бюрократия облигатно лжет не потому, что она непременно составлена из коррупционеров и мошенников (не исключено, что существуют ситуации, когда административный аппарат укомплектован честными людьми), но потому, что процессы, протекающие на надличностном уровне переработки информации, существенно отличаются от тех, которые присущие нашему – обыденному для восприятия – уровню. Здесь уместно снова напомнить о сущности мифа как проявлении информационных процессов, протекающих на надличностном уровне переработки информации.

Проблемы взаимопонимания, частным случаем которых является проблема интерпретации текста, возникают даже тогда, когда речь идет об обмене информацией между двумя системами одинакового уровня сложности (двумя собеседниками, даже общающимися на одном и том же языке, например). Применительно к системам, относящимся к разным уровням переработки информации, эта проблема, очевидно, может только усиливаться.

В порядке иллюстрации зададим риторический вопрос, не рассчитывая получить на него ответ. Принято говорить о современности как об эпохе постправды – мира наведенных иллюзий, где подавляющее большинство обывателей утратило не только критерии примитивно понимаемой истинности, но даже элементарные ориентиры «что хорошо – что плохо». Возникает немаловажный вопрос – кто породил такое положение дел? Некие темные силы в лице «обобщенного Билла Гейтса»? Политические элиты конкретных стран, претендующих на мировое господство? Безответственные блогеры? Или все же сама информационная среда? Включенность в нее подавляющее большинство людей склонно отрицать, хотя мало кто из современников действительно готов бросить вызов диктату среды – подавляющее большинство людей, особенно в

странах, где сильны традиции и влияние родственных связей, подчиняется ему безропотно.

Таким образом, тезис о способности ко лжи как о критерии интеллектуальности многопланов. Вполне возможно, что категория Лжи еще более трудна для последовательной философской интерпретации, нежели категория Истины, но это не отменяет возможности пользоваться ею в прикладных целях. Более того, «механизмы обмана», уже реализующиеся в системах, где протекают выраженные процессы информационной самоорганизации нужно раскрыть и для того, чтобы не быть беззащитными перед лицом информационных стихий, провозвестником которых является феномен бюрократии.

Отталкиваясь от сказанного выше, вернёмся к тезису, названному в [73] тезисом Мальцева – Тарского. Он гласит, что всякое описание ситуации, которое, с точки зрения человека, является полным, точным и формальным, может быть представлено в виде алгебраической системы.

Этот тезис, как справедливо отмечается в [74], никто не доказал, но и не опроверг. Исходя из него, можно утверждать, по крайней мере, в первом приближении, что поставленный выше вопрос предполагает некую «формализацию процесса сознательного обмана» и более того, его алгебраизацию.

Парадоксально, но искусственный интеллект невозможно научить творить, не заложив в него механизмы, аналогичные тем, что позволяют человеку лгать.

Разумеется, нет смысла конструировать систему, которая будет целенаправленно обманывать своих разработчиков, но сформулированные выше тезисы, как минимум, отчетливо показывают, насколько важным для дальнейшего развития систем искусственного интеллекта является возможность оперировать с представлениями, не укладывающимися в рамки примитивно понимаемого противопоставления «Истина – Ложь».

В настоящее время существует целый ряд логических систем, в которых закон исключенного третьего не возводится в ранг абсолютного [74,75]. Как отмечалось в главе 1, их разработка началась в первых десятилетиях XX века, под влиянием успехов неевклидовых геометрий. Базовым для классической логики является закон исключенного третьего (всякое высказывание либо истинно, либо ложно); работы Лукасевича [76] и его последователей положили начало созданию логических систем, в которых этот закон не выполняется. Сегодня в данном направлении получены многие существенные результаты [77-79], и уже со всей отчетливостью ставится вопрос об их использовании для создания систем искусственного интеллекта различных разновидностей.

Рассмотрим вопрос о создании логических систем, позволяющих использовать на практике тот критерий отличия интеллекта человека от условно «машинного», о котором говорилось выше.

Расширительная трактовка тезиса о способности интеллекта лгать звучит так: интеллект высших уровней (например, интеллект человека) способен

оперировать представлениями, которые не имеют отношения к реальности или имеют к ней только косвенное отношение. Очевидно, что именно эти способности человека (точнее, соответствующие механизмы функционирования интеллекта) примыкают к способности мыслить абстрактно, генерировать новые смыслы, фантазировать и т.д.

Следовательно, представляет интерес следующий шаг в разработке логических систем, отказывающихся от абсолютизации закона исключенного третьего. Это заставляет обратить самое пристальное внимание, в том числе, на древнеиндийские/буддистские философские концепции, один из базовых тезисов которых состоит в том, что истина вообще не может быть выражена в словах; истина лежит вне «Да» или «Нет».

Уже в VI–IV вв. до н.э. в Индии была разработана концепция «чатушкуотика» (т.е. «имеющая четыре вершины»), оперирующая четырьмя вариантами суждения о предмете: он есть, он не-есть, он и есть и не-есть, он ни есть, ни не-есть [79]. В дальнейшем она была существенно усложнена (доктрины аджнянавада и сйадвада, построения буддистских философов), но для целей данной работы достаточно ограничиться аналогиями с простейшим вариантом.

Суждение такого типа, как «предмет и существует, и не существует одновременно» и суждение, сопряженное ему в смысле чатушкуотики, на формализуемом языке допустимо описывать через *мнимую* компоненту логических переменных. Соответственно, при таком подходе перечень логических значений существенно расширяется; наряду с «Да», «Нет», «Неопределенно» как в логических системах, восходящих к логике Лукасевича, противопоставление «Да» - «Нет» дополняется парой на мнимой оси, которая также представляет собой противопоставление «мнимое Да» - «мнимое Нет». Одна из простейших трактовок последней пары (наряду с теми, которые непосредственно связаны с чатушкуотикой) состоит, например, в следующем:

- Истинно то, что первичное противопоставление подразумевает «по умолчанию»

- Ложно то, что первичное противопоставление подразумевает «по умолчанию».

Применительно к аппарату диалектических категорий такие суждения допускают, в том числе, и предельно прозрачную интерпретацию. Предмет/сущность может быть описана в терминах определенного противопоставления, тогда мнимая часть логической переменной принимает положительное значение независимо от того, какой из вариантов базового суждения верен и напротив, предмет/сущность вообще не описывается через такое противопоставление (упрощая, данный вопрос не имеет к нему отношения).

Независимо от конкретной интерпретации, комплексная логическая переменная представима в обычной для комплексных чисел форме

$$a = a_1 + ia_2 \leftrightarrow (a_1, a_2) \quad (3.1)$$

Рассмотрим одну из алгебраических структур, которая может быть положена в основу построения комплекснозначных логик. Классическая логика, оперирующая логическими значениями «Истина» и «Ложь», как известно, теснейшим образом связана с двоичной алгеброй, операции которой сводимы к операциям над двумя элементами 0 и 1 поля Галуа  $GF(2)$ .

Исследования в области многозначных логик, как правило, оперируют табличной формой представления логических операций (таблицами истинности [23]). Уже для логик, оперирующих четырьмя возможными значениями логических переменных, такое представление становится весьма громоздким. Поэтому представляется целесообразным начать с построения поля Галуа, которое для комплекснозначной логики будет играть такую же роль, что поле  $GF(2)$  – для классической.

Рассмотрим множество сумм вида (3.1), в котором компоненты  $a_1, a_2$  могут приобретать значения из тройки  $(-1, 0, 1)$ , что соответствует полю Галуа  $GF(3)$ , т.е. троичной логике.

Определим операцию суммирования в соответствии с обычной записью

$$a + b = a_1 + ia_2 + b_1 + ib_2 = (a_1 + b_1) + i(a_2 + b_2), \quad (3.2)$$

а операции сложения для действительной и мнимой частей как

$$1 + 1 = -1; -1 - 1 = 1; -1 + 1 = 1 - 1 = 0, \quad (3.3)$$

$$i + i = -i; -i - i = i; -i + i = i - i = 0 \quad (3.4)$$

Правила умножения остаются теми же, что и при классическом использовании комплексных чисел, в частности,

$$-1 \cdot -1 = 1; i \cdot i = -1; i \cdot (a_1 + ia_2) = ia_1 - a_2 \quad (3.5)$$

Непосредственной проверкой можно легко показать, что для рассматриваемого множества, содержащего 9 элементов (Таблица 1), наделенного свойствами (3.1) - (3.4), выполняются аксиомы поля. Поскольку все поля Галуа с одинаковым числом членов изоморфны, можно утверждать, что данное множество есть поле Галуа  $GF(3^2)$ .

Для наглядности выпишем соотношение для одного из частных случаев вычислений при помощи правил (3.1) – (3.4)

$$(1 \pm i) \cdot (1 \pm i) = 1 \pm i \pm i - 1 = \mp i, \quad (3.6)$$

которое иллюстрирует, замкнутость рассматриваемого поля относительно определенных на нем операций сложения и умножения.

Таблица 1. Элементы поля Галуа  $G = GF(3^2)$  в используемом представлении.

$a$	$a_2 = -1$	$a_2 = 0$	$a_2 = 1$
$a_1 = -1$	$a_{11} = -1 - i$	$a_{12} = -1$	$a_{13} = -1 + i$
$a_1 = 0$	$a_{21} = -i$	$a_{22} = 0$	$a_{23} = i$
$a_1 = 1$	$a_{31} = 1 - i$	$a_{32} = 1$	$a_{33} = 1 + i$

Как будет показано в последующих разделах, такая форма представления логических переменных допускает переход к алгебраической форме операций над ними.

Но, перед тем как перейти к этим вопросам, покажем, что использование многозначных логик представляет весьма важные преимущества, в том числе, и в классических областях применения обработки экспериментальных данных.

#### **4. Цифровая обработка сигналов с точки зрения использования многозначных логик: методологический аспект**

Современные системы обработки информации (в том числе и сугубо технического характера) также развиваются в направлении, которое неизбежно заставит обратить самое пристальное внимание на философские аспекты теории информации. В частности, речь идет даже о таких сравнительно простых устройствах, как аналого-цифровые преобразователи.

А именно, совершенствование аналого-цифровых преобразователей рано или поздно заставит искать ответ на вопрос, который до сих пор не найден математиками.

Конкретно, речь идет о том какую информацию несет в себе гладкая кривая. Уместно подчеркнуть, что несмотря на все успехи теории информации до сих пор этот вопрос по существу остается без ответа.

Если рассматривать этот вопрос с традиционной точки зрения, то на первый взгляд все представляется ясным: оцифровать аналоговый сигнал – это означает преобразовать его в двоичную форму, т.е. преобразовать его к такому представлению, которое максимально полно изучено теорией информации и которое допускает количественную оценку.

Вместе с тем представляется очевидным, что прямая оцифровка сигнала, осуществляемая классическим методом, т.е. разбиение интервала амплитуд на определенные участки (такты) с присвоением каждому из них определенного номера и последующей соотнесением сигнала, который реализуется на отдельном такте, к определенному диапазону амплитуд является более чем избыточной процедурой, что будет показано чуть ниже.

Пока что отметим, что с точки зрения максимально общих позиций следует утверждать, что любое аналого-цифровое преобразование, равно как и цифровые средства коммуникации будут максимально эффективными тогда и только тогда, когда они будут в состоянии максимально точно указать количество информации, содержащейся в сообщении или изображении и передать только этот объем информации.

Как вытекает из материала предыдущих разделов, этот вопрос также представляет значительный интерес с точки зрения разработки эмпирических подходов к установлению законов мышления. Максимальная компрессия информации в сообщениях и изображениях, который и составляют, например, «цифровой облик» любого пользователя социальной онлайн.

Соответствующие тенденции уже просматриваются. Так, в литературе описаны аналого-цифровые преобразователи на нейронных сетях [80,81], которые отчасти решают указанный выше вопрос сугубо эмпирическим путем.

Предполагается, что данная нейронная сеть, обучаясь, может решать задачу по обеспечению аналого-цифрового преобразования гораздо более эффективно нежели классический подход.

Рассмотрим данный вопрос подробнее.

Если подходить к работе аналого-цифровых преобразователей с традиционной точки зрения, то придется предположить, что данный

преобразователь должен оперировать с информацией, количество которой  $J$  выражается очевидной формулой

$$J = J_0 N = N \ln_2 k \quad (4.1)$$

где  $J_0$  – информация, которая передается за один такт, а  $N$  – число тактов,  $k$  – число уровней, на которые разбивается интервал изменения амплитуды исследуемого сигнала.

Очевидно, что эта формула предполагает работу с сигналом произвольного вида (единственным ограничением на него является конечный диапазон изменения амплитуды). Вместе с тем, из самых общих соображений представляется очевидным, что, по крайней мере, спектральный состав обрабатываемого сигнала приводит определенные ограничения на объем содержащейся в нем информации.

Собственно, именно это и выражает известная теорема Котельникова, де-факто лежащая в основе всей современной телекоммуникационной индустрии [82], согласно которой любой сигнал, лежащий в ограниченной полосе частот, может быть редуцирован к системе дискретных отсчетов, амплитуда которых отвечает диапазону изменения исходного сигнала.

Но, на этот вопрос можно посмотреть и иначе. А именно, если кривая является в том или ином смысле гладкой, то очевидно, передаваемая ею информация будет намного ниже, нежели информация, содержащаяся в произвольном сигнале, выражаемой формулой (4.1).

Действительно, если кривая гладка, то тогда скачки между двумя амплитудными значениями или редки, или являются и вовсе запрещенными. Следовательно, даже, если формально применять теорию Шеннона, в которой учитываются частоты повторения различных символов и их комбинаций, то тогда можно прийти к выводу о том, что реальный объем информации в сигнале, описываемой в гладкой кривой, будет намного ниже нежели тот, что дается формулой (4.1).

Для доказательства этого утверждения достаточно вспомнить, что теория Шеннона распространяется на последовательности символов алфавита, в которых учитывается не только частота повторения сигнала, но и корреляции между повторением последующего сигнала и предыдущим. Типичным примером в этом отношении, который в том числе часто используется в учебниках [83], является корреляцией между появлением согласных и гласных звуков в русском языке. Наглядной иллюстрацией здесь является слово «длинношеее», которое используется как пример того, что вероятность появления в сообщении трех букв «е» подряд очень мала.

Следовательно, можно попытаться развить подход, в котором специфика информационных свойств сравнительно гладких (в том или ином смысле) кривых будет использоваться для оптимизации процедуры преобразования аналогового сигнала в цифровой.



Актуальность работ в данном направлении представляется очевидной, поскольку с ростом объёма информации, передаваемой по телекоммуникационным сетям, встает задача по оптимизации их пропускной способности. Подчеркиваем еще раз, что нейронные сети здесь могут рассматриваться здесь как вполне естественные (хотя и далеко не единственные) средства для решения данной задачи.

Действительно, уместно провести аналогию между схемами, которые традиционно используются для аналого-цифрового преобразования и нейронными сетями. Очевидно, что классическая схема аналого-цифрового преобразования, представленная на рисунке 4.1, предназначена для того, чтобы оперировать сигналами, содержание информации в которых описывается формулой (4.1).

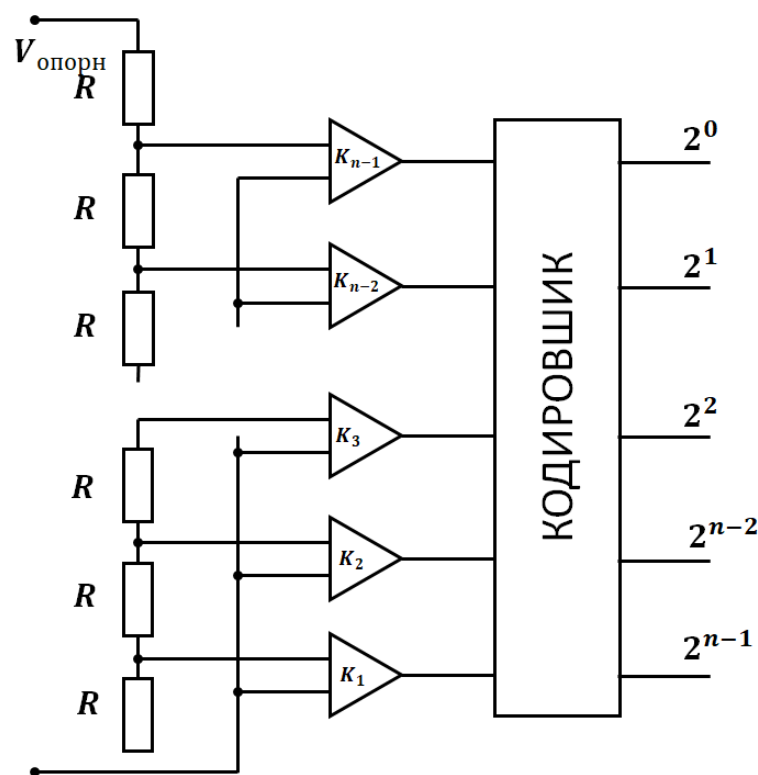


Рисунок 4.1 – типовая схема аналого-цифрового преобразователя на основе системы компараторов.

Данные схемы не учитывают в полной мере ограничений на характер изменения сигнала, это вытекает из того, что они предназначены для обработки произвольных сигналов, лежащих в заданном диапазоне изменения амплитуд.

В настоящее время, однако, существуют работы, в которых осуществляется попытка сопряжения аналого-цифровых преобразователей с нейронными сетями, в частности, речь идет о цитированных выше работах [80,81] и им аналогичных.

В данном случае нейронная сеть используется для того, чтобы оптимальным образом использовать ресурсы компараторов, входящих в состав схемы (рис.4.2 [80,81]). Подаваемые на входы компараторов сигналы сравнения изменяются в зависимости от характера обрабатываемого сигнала, причем соответствующее решение принимается нейронной сетью [80,81].

Конкретно, структурная схема аналого-цифрового преобразователя на основе нейронных сетей (рис. 2.2, [80,81]) имеет вход, на который поступает аналоговое напряжение от внешних устройств, выходом является двоичное число, соответствующее этому напряжению. Количество входных сигналов определяется числом  $n$ , поэтому количество выходных сигналов составляет  $n \cdot N$ -разрядных чисел, где  $N$  – максимальная разрядность индивидуального АЦП, формируемого для конкретного входного сигнала.

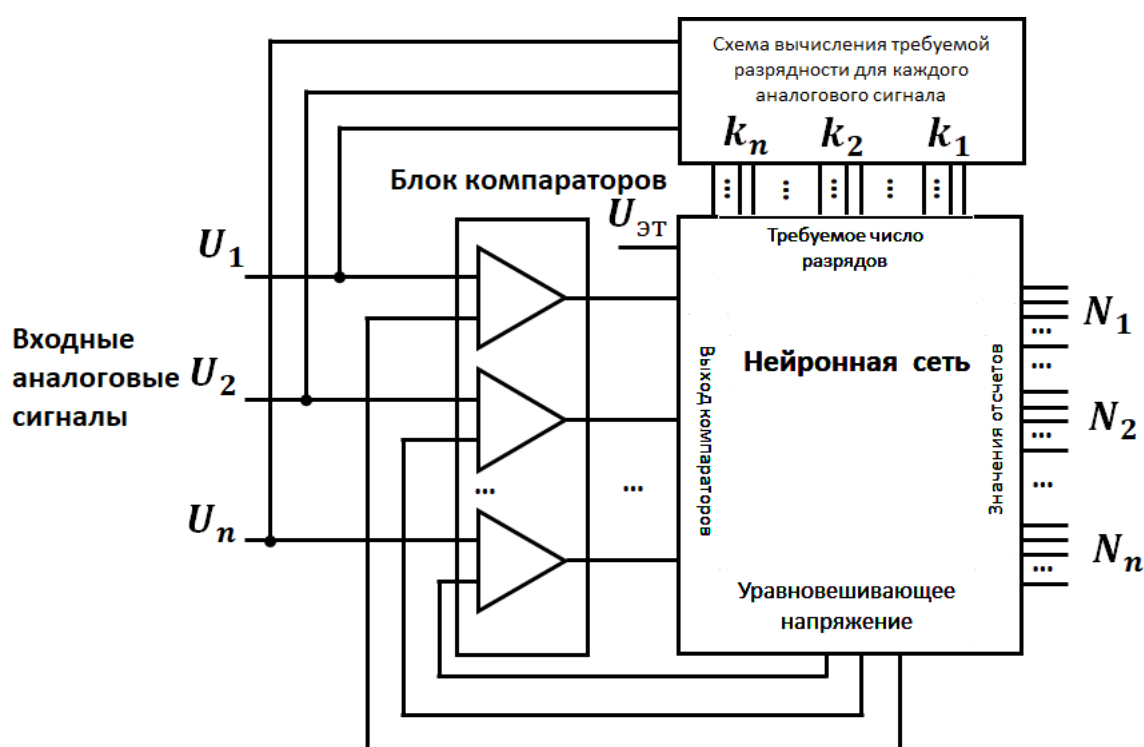


Рисунок 4. 2 – Структурная схема аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети:  $U_i$  - входные аналоговые напряжения;  $k_i$  – необходимое количество разрядов в АЦП для обработки  $i$ -го входного сигнала;  $N_i$  – значение отсчета, полученного в АЦП для  $i$ -го входного сигнала;  $U_{ЭТ}$  – это постоянное напряжение, используемое АЦП для определения весовых коэффициентов разрядов

Аналого-цифровое преобразование осуществляется методом поразрядного взвешивания таким образом, что входной сигнал поступает на вход одного из компараторов, а уравнивающее напряжение создается нейронной сетью, в которой нейроны объединяются в индивидуальный аналого-цифровой

преобразователь в зависимости от необходимой разрядности для качественной обработки данного аналогового сигнала.

Необходимая разрядность создаётся за счёт специальной схемы, которая определяет её по каждому входному сигналу и передаёт в виде числа  $k_i$  на соответствующие входы нейронной сети. Кроме чисел  $k$ , на входы нейронной сети поступают сигналы с выходов компараторов, а также сигналы метки и готовности, которые являются служебными и циркулируют внутри нейронной сети.

Выходы нейронной сети представляют собой параллельные выходы  $n$  сдвиговых  $N$ -разрядных регистров отдельно по каждому из входных аналоговых сигналов, при этом после формирования индивидуального аналого-цифрового преобразователя значение каждого отсчёта будет определяться первыми  $k$  разрядами из  $N$ .

Значения отсчётов передаются на внешнее обрабатывающее устройство. Уравновешивающее напряжение, получаемое с помощью нейронной сети, передаётся на соответствующий компаратор. Сигнал метки – служебный сигнал, который синхронизирует работу сформированных индивидуальных аналого-цифровых преобразователей. Сигнал готовности – служебный сигнал, который сообщает схеме об окончании формирования индивидуального аналого-цифрового преобразователя. Служебные сигналы формируются и используются только самой нейронной сетью.

Эталонное напряжение, подаваемое через отдельный вход, задаёт максимальную амплитуду измеряемого аналогового сигнала и используется нейроном, который является старшим разрядом в сформированном индивидуальном аналого-цифровом преобразователе. При этом подключиться к эталонному напряжению, а значит занять положение старшего разряда может любой из нейронов. Остальные нейроны заменяют его напряжением, получаемым с матрицы  $R-2R$ , которая образуется самими нейронами в процессе коммутации и задаёт «вес» каждого нейрона.

Интересно отметить, что в известном смысле, что рассматриваемая проблема также примыкает и к проблеме, которая в последнее время широко обсуждается в связи с развитием такого направления как Big data и Data mining.

Действительно, обработка любых экспериментальных данных в конечном счете направлена на то, чтобы установить определенные закономерности. С точки зрения установления закономерности очевидно, что эта задача неразрывно связана с измерением той информации, которая содержится в данной конкретной экспериментальной кривой. Если будет известно, что информация, содержащаяся в данной экспериментальной кривой, не превышает определенную величину, то упрощается вопрос о том, как именно эту информацию можно измерить и даже преобразовать в соответствующую закономерность. Иными словами, вопрос об измерении количества информации, содержащейся в гладкой кривой, подчеркиваем еще раз, сейчас очень далек от решения, но приобретает все большую и большую актуальность.

Затронутый вопрос возвращает к представлениям диалектического позитивизма о природе информации. Как подчеркивалось в предшествующих главах, информация представляет собой весьма нетривиальную диалектическую категорию, более того в информационном мире существует своя иерархия уровней организации, которую можно уподобить иерархии уровней организации материи.

Та информация, с которой имеет дело ее классическая теория, в основном ориентирована на анализ информации, содержащейся в сообщениях различного рода. С точки зрения диалектического позитивизма информация, содержащаяся в конкретном сообщении, относится к низшему уровню иерархии. На следующем уровне находятся системы переработки информации. Здесь возникает вполне определенный нетривиальный вопрос. Классическая теория информации очень легко способна оценить ее количество, содержащееся в некой двоичной последовательности нулей и единиц. Однако, наряду с этой последовательностью существуют и правила оперирования с ними. В частности, одним из них является обычная операция сложения двух двоичных чисел. Подчеркиваем, что это правило также представляет собой вполне определенный объект информационной природы, но он существенным образом отличается от самой информации, которая перерабатывается с его помощью. Правило оперирования с двоичными последовательностями есть нечто качественно отличное от самих двоичных последовательностей. Это тоже информационный объект, но он не просто качественно отличается от первого, но и находится на более высоком уровне иерархии информационных объектов. Здесь уместно подчеркнуть, что на самом последнем уровне (наивысшем уровне иерархии) располагается то, что мы именуем интеллектом.

Итак, правила обработки информации – это нечто качественно иное, соответственно, вопрос о том каково количество информации, содержащейся в таких правилах более чем нетривиален. Действительно, любой закон в конечном счете можно рассматривать как некие правила обработки информации. В частности, законы классической механики позволяют предсказывать движение небесных тел, позволяют предсказывать движение летательных аппаратов и т.п.

Иными словами, располагая определенной исходной информацией, с их помощью можно получить новую информацию прогностического характера, которой до этого мы не располагали. Прогноз – это есть процедура получения новой информации на основе исходной информации. Очевидно, что такая операция т.е. прогнозирование осуществляется при помощи тех или иных правил, алгоритмов, закономерностей и т.д. С формальной точки зрения законы Ньютона или законы классической механики позволяют получить бесконечно большой объем информации, следовательно, к оценке информации, которая содержится в них самих классический подход неприменим.

Разумеется, с формальной точки зрения можно подсчитать количество информации, содержащейся в символьной записи того или иного алгоритма, однако, это не будет решением задачи. Равным образом не будет решением задачи, если мы пойдем по пути подсчета количества простейших логических

операций, необходимых для реализации того или иного алгоритма. Это информация, которая содержится в представлении данного объекта при помощи информации более низкого уровня, но природа правил оперирования с информацией отличается от нее самой несмотря на то, что эти правила сами представляют собой информационный объект.

К вопросу, который обсуждался выше, все эти суждения имеют самое непосредственное отношение. Действительно, если мы говорим о базовой проблеме data mining т.е. об установлении некой закономерности на основе экспериментальных данных, то речь фактически идет о максимальной компактификации информации; о том, чтобы вместо экспериментальной кривой получить закон, выражающийся в максимальной емкой, компактной и лаконичной форме.

На этот вопрос можно посмотреть и с несколько другой точки зрения. Действительно, предположим, что у нас имеется некая кривая, являющаяся решением конкретного дифференциального уравнения. Можно поставить вопрос об оценке количества информации, которая содержится в этой кривой, отталкиваясь от классического подхода, восходящего к Шеннону т.е. разбить соответствующий интервал текущей переменной на такты или подинтервалы, разбить интервал изменения функции, являющейся решением на подинтервалы также, поставить соответствие каждому подинтервалу определенный символ алфавита и использовать формулу Шеннона непосредственно.

Очевидно, что в этом случае объем информации, получаемой таким способом, будет очень велик, но в то же время, если нам известно, что кривая является решением дифференциального уравнения, то фактически вся информация о ней заложена в само это уравнение и в граничные условия. Другими словами, получается, что де-факто объем информации, необходимой для передачи этой кривой, гораздо меньше, чем это дает формальный подсчет.

Иными словами, проблема компактификации информации, которая встает в том числе и с чисто с технической и аппаратной точки зрения неожиданным образом пересекается с проблемами не только Data mining, но и с проблемами сугубо философского характера.

С самых общих методологических позиций это означает, что наряду с двоичной логикой для цифровой обработки сигналов может применяться и многозначная логика (точнее, различные из разновидности). В следующей главе доказывається, что весьма перспективной с точки зрения цифровой обработки сигналов является троичная логика, в особенности в применении к цифровой обработке медленно изменяющихся сигналов.

## **5. Принципиальные особенности радиочастотных спектров медленно изменяющихся сигналов**

В данной главе рассматриваются особенности цифровой обработке медленно изменяющихся сигналов, а точнее – сигналов, обладающих  $\varepsilon$ -покрытием. Очень часто цифровой обработке действительно приходится подвергать сигналы, которые меняются достаточно медленно.

Более того, под такими сигналами можно понимать практически все реально встречающиеся сигналы, поскольку передача сообщений по любым каналам происходит, как правило, в ограниченной полосе частот, а, следовательно, скорость изменения сигнала всегда является конечной, так как это связано с инерционностью любых систем, так или иначе задействованных для передачи сообщений шире любых сигналов.

Анализ именно медленно изменяющихся сигналов позволяет показать, что существует возможность для кардинального пересмотра существующих подходов к цифровой обработке сигналов. А именно, если до самого последнего времени под цифровой обработкой сигналов поднимались процедуры, когда осуществляется оцифровка сигнала, относящегося к одному отдельно взятому такту, то представленные в данной главе материалы позволяют утверждать, что на самом деле цифровую обработку сигналов можно проводить методами спектрального радиочастотного анализа.

В перспективе это позволяет существенно упростить существующие процедуры, а главное сжать объём информации, получаемой в результате цифровой обработки. Нет необходимости подчеркивать, что сейчас эта задача является более чем актуальной в связи с тем, что всё большее количество информации распространяется по телекоммуникационным сетям и существует устойчивый запрос на дальнейшее увеличение их пропускной способности.

Для любой достаточно гладкой кривой  $Y = Y(X)$  можно построить  $\varepsilon$ -покрытие, которое использует декартову сетку с шагом  $\Delta X$  по оси абсцисс и с шагом  $\Delta Y = \varepsilon$  по оси ординат. Отличительной особенностью  $\varepsilon$ -покрытия является то, что значение функции  $Y$  на шаге  $X_{i+1}$  не более чем на  $\pm \varepsilon$  отличается от ее значения на шаге разбиения  $X_{i+1}$ . Другими словами, предполагается что если кривая на  $i$ -м шаге проходит через интервал от  $Y_i$  до  $Y_{i+1}$ , то на следующем шаге разбиения она пройдет через соседние клетки, формируемые указанной выше декартовой сеткой, т.е. значение функции или останется в том же интервале  $[Y_i, Y_{i+1}]$ , или попадет в интервал  $[Y_{i+1}, Y_{i+2}]$ , или в интервал  $[Y_{i-1}, Y_i]$ .

Очевидно, что при оцифровывании данной кривой в том смысле, которому этот термин придает стандартный подход к аналого-цифровому преобразованию, данную кривую можно заменить последовательностью отсчетов, отвечающих точности разбиения. Если дискретизированным уровням сигнала поставить в соответствие натуральные числа, то для кривой, обладающей  $\varepsilon$ -покрытием, номер уровня сигнала на каждом следующем такте будет отличаться от уровня на предыдущем такте на  $+1$ ,  $0$  или  $-1$ .

Использование кривых, для которых существует  $\varepsilon$ -покрытие, позволяет наглядно продемонстрировать, что ограничение на скорость изменения сигнала,

т.е. на его производную, налагают вполне определенные ограничения на количество информации, которое может передаваться при помощи такого сигнала. Действительно, если известен начальный уровень сигнала, то тогда уровень сигнала на всех последующих тактах может быть определён через прибавление к исходному уровню вариации, амплитуда которой не превышает единицу. Это означает, что информация, которая содержится в этом сигнале, даётся формулой следующего вида:

$$J = N \ln_2 3 \quad (5.1)$$

Можно легко показать, что если число дискретных уровней сигнала выше, чем 3, то количество информации, даваемой формулой (5.1) оказывается намного ниже, чем формулой (4.1). Другими словами, ограничение по скорости изменения сигнала действительно связано с изменением количества информации, передаваемой с его помощью.

Очевидно также, что характер  $\varepsilon$ -покрытия существенно зависит от максимального значения производной, которая допускает физическая реализация соответствующего процесса. Здесь уместно еще раз подчеркнуть, что существует достаточно много практических приложений, в которых скорость изменения управляющего сигнала действительно является сравнительно небольшой.

Типичным примером здесь являются системы адаптивной оптики, предназначенные для использования в солнечной энергетике, конкретно для отслеживания положения Солнца на небосклоне. Можно привести также ряд других примеров, в которых аналого-цифровые преобразователи заведомо будут использованы для сигналов, изменяющихся со сравнительно низкой скоростью. Другими словами, использованное выше предположение о существовании максимального значения скорости изменения сигнала является вполне оправданным. Покажем теперь, что сигналы, для которых существует  $\varepsilon$ -покрытие, допускают существенно иной подход к реализации аналого-цифровых преобразований, нежели тот, что описан в классических учебных пособиях и монографиях.

Очевидно, что если сигнал приближённо заменяется его моделью, отвечающий  $\varepsilon$ -покрытию, то он автоматически удовлетворяет условиям теоремы, обратной к теореме Котельникова.

Если вместо сигнала можно использовать его дискретную модель, которая заведомо предполагает существование некоторых эквидистантных по оси абсцисс отсчётов, то спектр такого модельного сигнала будет ограничен, конкретно, он будет лежать в диапазоне от 0 до  $\frac{1}{2T_0}$  по шкале частот, где  $T_0$  - продолжительность отдельного такта. При этом для сигнала, допускающего  $\varepsilon$ -покрытие, совокупность отсчётов, очевидно, удовлетворяющих тому требованию, которое было сформулировано выше, т.е. номер дискретного

уровня сигнала на  $i + 1$  такте отличается от номера уровня на  $i$ -м такте не более чем на плюс или минус единицу.

Сигнал  $u(t)$  с ограниченным спектром можно представить в следующем виде

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\omega_0} \exp(i\omega t) A(\omega) d\omega \quad (5.2)$$

где  $\omega$  – круговая частота,  $A(\omega)$  – спектр сигнала, данная функция принимает комплексные значения,  $\omega_0$  – пороговая круговая частота.

Одна из классических схем вывода теоремы Котельникова предполагает, что спектр сигнала, фигурирующий в формуле (5.2) периодизуется по шкале частот, при этом возврат к исходному спектру обеспечивается через умножение этой функции на прямоугольную функцию, даваемую с записью:

$$\text{rect}_{\omega_0}(\omega) = \begin{cases} 0, & \omega < -\omega_0 \\ 1, & -\omega_0 \leq \omega \leq \omega_0 \\ 0, & \omega > \omega_0 \end{cases} \quad (5.3)$$

В результате можно записать:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t) \text{rect}_{\omega_0}(\omega) A_0(\omega) d\omega \quad (5.4)$$

где функция  $A_0(\omega)$  получена из  $A(\omega)$  продолжением по периодизации, т.е.

$$A_0(\omega) = \begin{cases} A(\omega), & \omega \in [-\omega_0, \omega_0] \\ A(\omega \pm n\omega_0), & \omega \notin [-\omega_0, \omega_0] \end{cases} \quad (5.5)$$

В формуле (5.4), как можно видеть, фигурирует периодическая функция  $A_0(\omega)$  причём период следования по шкале частот составляет  $2\omega_0$ . Именно из периодического характера функции, фигурирующей в записанной выше формуле (5.5), и вытекает основной результат теоремы Котельникова, поскольку периодическая функция допускает разложение в ряд Фурье в соответствии с записью

$$A_0(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} U_n \exp(i\omega n T_0) \quad (5.6)$$

$$\text{где } T_0 = \frac{\pi}{\omega_0}$$

Подставляя разложение (5.6) в формулу (5.4), можно перейти к выражению исходного сигнала через суперпозицию функций, амплитуда каждый из которых определяется значением отсчёта в соответствующей точке.

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} U_n \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t + i\omega n T_0) \text{rect}_{\omega_0}(\omega) d\omega \quad (5.7)$$



Это вытекает непосредственно из вида формулы (5.7):

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} U_n \mathbf{F}^{-1}[\text{rect}_{\omega_0}(\omega)](t + nT_0) \quad (5.8)$$

где  $\mathbf{F}^{-1}$  – символ обратного преобразования Фурье,

$$\mathbf{F}^{-1}[\text{rect}_{\omega_0}(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t) \text{rect}_{\omega_0}(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\omega_0} \exp(i\omega t) d\omega \quad (5.9)$$

откуда

$$\mathbf{F}^{-1}[\text{rect}_{\omega_0}(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{it} (\exp(i\omega_0 t) - \exp(-i\omega_0 t)) = \frac{1}{\pi t} \sin(\omega_0 t) \quad (5.10)$$

В литературе функцию, стоящую в правой части формулы (5.10) традиционно обозначают как

$$\text{sinc}(x) = \frac{1}{x} \sin(x) \quad (5.11)$$

Принимая во внимание, что

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi}{T_0} \quad (5.12)$$

Формулу (5.8) можно записать в общепотребительной форме

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{U_n}{T_0} \text{sinc}\left(\frac{\pi}{T_0}(t - nT_0)\right) \quad (5.13)$$

где порядок суммирования по сравнению с формулой (5.8) заменен на противоположный.

Подчеркиваем, что по смыслу записей (5.2) и (5.6) величины  $U_n$  имеют размерность времени (если функция, описывающая рассматриваемый сигнал, приведена к безразмерной), т.е. запись (5.13) сохраняет размерность. Для дальнейшего важно также подчеркнуть, что функция  $\text{sinc}(x)$  обладает вполне определенной особенностью: она обращается в ноль во всех точках

$$x = n\pi \quad (5.14)$$

за исключением случая  $n = 0$ .

Следовательно, рассматривая значение функции (5.13) в любой точке  $t = mT_0$

$$u(mT_0) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{U_n}{T_0} \operatorname{sinc} \left( \frac{\pi}{T_0} (mT_0 - nT_0) \right) = \frac{U_m}{T_0} \quad (5.15)$$

Следовательно, вместо амплитуд членов ряда Фурье (5.6) можно перейти к значениям сигнала в дискретных отсчетах, понимаемых в смысле теоремы Котельникова

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} u(nT_0) \operatorname{sinc} \left( \frac{\pi}{T_0} (t - nT_0) \right) \quad (5.16)$$

Непрерывная функция выражается через свои значения в отдельных эквидистантных точках.

Столь детальный анализ вывода формул, приводящих в итоге к теореме Котельникова, для целей настоящей работы представляет интерес по следующей причине.

Разобьём спектральный интервал, в котором задан спектр рассматриваемой функции, на три следующих интервала  $\left[-\omega_0, -\frac{1}{3}\omega_0\right]$ ,  $\left[-\frac{1}{3}\omega_0, \frac{1}{3}\omega_0\right]$ ,  $\left[\frac{1}{3}\omega_0, \omega_0\right]$ .

К каждому из этих интервалов по отдельному можно применить теорему Котельникова, а точнее вывод приведённых выше формул. Для интервала  $\left[\frac{1}{3}\omega_0, \omega_0\right]$  имеем

$$u_1(t) = \int_{\frac{1}{3}\omega_0}^{\omega_0} \exp(i\omega t) A(\omega) d\omega \quad (5.17)$$

Сделаем в (5.17) замену переменной

$$\omega_1 = \omega - \frac{2}{3}\omega_0 \quad (5.18)$$

Тогда (5.18) можно записать в виде

$$u_1(t) = \exp\left(i\frac{2}{3}\omega_0 t\right) \int_{-\frac{1}{3}\omega_0}^{\frac{1}{3}\omega_0} \exp(i\omega_1 t) A(\omega_1) d\omega_1 \quad (5.19)$$

Очевидно, интеграл в формуле (5.19) идентичен тому, который появляется при выводе теоремы Котельникова с тем отличием, что интегрирование проводится не по интервалу  $[-\omega_0, \omega_0]$ , а по интервалу  $\left[-\frac{1}{3}\omega_0, \frac{1}{3}\omega_0\right]$ . Это означает, что период следования отчетов, которые появляются в силу того, что функция, задаваемая на конечном отрезке, может быть периодизована, оказывается второе больше:

$$u_1(t) = \exp\left(i\frac{2}{3}\omega t\right) \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} u_1(nT_1) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi}{T_1}(t - nT_1)\right) \quad (5.20)$$

где  $T_1 = 3T_0$

При выводе формулы (5.20) можно автоматически пользоваться результатом (5.16), именно поэтому выше мы столь подробно остановились на одной из схем доказательства теоремы Котельникова.

Для интервала  $\left[-\frac{1}{3}\omega_0, \frac{1}{3}\omega_0\right]$  непосредственно на основании теоремы Котельникова можно записать

$$u_2(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} u_2(nT_1) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi}{T_1}(t - nT_1)\right) \quad (5.21)$$

где также период следования отсчетов является утроенным по сравнению с исходным  $T_1 = 3T_0$

Наконец, для интервала  $\left[-\omega_0, -\frac{1}{3}\omega_0\right]$  имеем

$$u_3(t) = \int_{-\omega_0}^{-\frac{1}{3}\omega_0} \exp(i\omega t) A(\omega) d\omega \quad (5.22)$$

Сделаем (5.22) в замену переменной, аналогичную (5.18)

$$\omega_3 = \omega + \frac{2}{3}\omega_0 \quad (5.23)$$

Тогда (5.22) можно записать в виде

$$u_3(t) = \exp\left(-i\frac{2}{3}\omega_0 t\right) \int_{-\omega_0}^{-\frac{1}{3}\omega_0} \exp(i\omega_3 t) A(\omega_3) d\omega_3 \quad (5.24)$$

Откуда, повторяя выкладки, сделанные для интервала  $\left[\frac{1}{3}\omega_0, \omega_0\right]$ , получаем

$$u_3(t) = \exp\left(-i\frac{2}{3}\omega_0 t\right) \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} u_3(nT_1) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi}{T_1}(t - nT_1)\right) \quad (5.25)$$

По построению должно иметь место

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) \quad (5.26)$$

Суммируя выражения для частных сигналов  $u_i(t)$ , даваемые выражениями (5.20), (5.21) и (5.25), получаем

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Q(t) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi}{T_1}(t - nT_1)\right) \quad (5.27)$$

где

$$Q(t) = u_1(nT_1)\exp\left(-i\frac{2}{3}\omega_0 t\right) + u_3(nT_1)\exp\left(-i\frac{2}{3}\omega_0 t\right) + u_1(nT_1) \quad (5.28)$$

Можно заметить, что выражение (5.27) относится к системе отсчетов, период следования которых втрое превышает период следования отсчетов, исчерпывающе описывающих исходный сигнал с ограниченным спектром. (Далее будем именовать эту систему отсчетов исходной.) В известном смысле, выражение (5.27) разбивает исходную последовательность тактов на группы по три такта, информация о сигнале в пределах которой заложена в выражение (5.28). Преобразуем его к действительным функциям.

$$Q(t) = (u_1 + u_3) \cos\left(\frac{2}{3}\omega_0 t\right) - i(u_1 - u_3) \sin\left(\frac{2}{3}\omega_0 t\right) + u_2 \quad (5.29)$$

Примем во внимание связь между граничной частотой для исходного сигнала и периодом следования отсчетов  $\omega_0 = \frac{2\pi}{2T_0}$ . Тогда формулу (5.29) можно переписать в виде

$$Q(t) = (u_1 + u_3) \cos\left(2\pi \frac{t}{3T_0}\right) - i(u_1 - u_3) \sin\left(2\pi \frac{t}{3T_0}\right) + u_2 \quad (5.30)$$

Полученный результат целесообразно сравнить с формулой, которая непосредственно вытекает из разложения в ряд Тейлора. Действительно, если мы предполагаем, что кривая является достаточно гладкой, то на сравнительно небольших временных интервалах, в частности, на протяжении трех тактов функцию можно заменить на её разложение в ряд Тейлора. Соответственно, в этом случае для описания поведения сигнала при его разбиении на три такта допустимо пользоваться следующей формулой:

$$u(t_i \pm \Delta t) = u(t_i) \pm \left.\frac{du}{dt}\right|_{t=t_i} \Delta t + \left.\frac{d^2u}{dt^2}\right|_{t=t_i} (\Delta t)^2 \quad (4.31)$$

Отсюда вытекает, что для адекватной цифровой обработки сигнала, описываемого гладкой кривой, при переходе к группе из трех тактов необходимо установить значение трех функций в центральном такте данной группы; это - сама функция, её первая и её вторая производная.

Подчеркиваем, что необходимость разложения в ряд Тейлора до второй производной включительно вытекает из представленного выше анализа на основе теоремы Котельникова.

А именно, как показывает сравнение формул (5.30) и (5.31), информация о значении второй и первой производной фактически оказывается заложена в ту полосу частот, которая может быть отделена от полосы частот, связанных со значениями самой функции, отсчитываемой через три такта. В частности, из данного сравнения вытекает, что симметричные относительно центрального такта отклонения связаны с косинусоидальным членом в формуле (5.30), а антисимметричные – с синусоидальным.

Иначе говоря, соображения, которые заставляют учитывать именно две первых производных являются сугубо принципиальными. Действительно, обратим еще раз внимание на то, что диапазон частот, в которых укладывается спектр рассматриваемого сигнала был поделен на две неравные части.

Это связано со следующими обстоятельствами.

Рассмотрим гармонический сигнал, модулированный сигналом в определённой полосе частот. Как хорошо известно из радиотехники, в этом случае спектр сигнала содержит комбинационные частоты, иными словами, полоса, которую занимает этот сигнал, становится в два раза шире, чем полоса исходного сигнала. Тем не менее, информация, которая передается таким сигналом, в соответствии с теоремой Котельникова отвечает ширине исходной полосы. Дело в том, что в этом случае возможности удвоенной полосы пропускания частот используется не полностью. Наряду с модуляцией гармонического сигнала, скажем синусоидального, для передачи информации можно использовать модуляцию гармонического сигнала, противоположного по фазе, то есть в данном случае косинусоидального.

Этот сигнал способен нести такой же информацию, иными словами, в удвоенной полосе частот можно передавать информацию при помощи модуляции двух противофазных сигналов.

Именно по этой причине нами и было использовано достаточно специфическое разбиение полосы частот на две неравные части, относящиеся друг другу по ширине как два к одному. Можно видеть, что в данном случае информация о сигнале фактически содержится в трех полосах частот, каждое из которых составляет  $1/3$  от исходной. Однако поскольку полосы от  $\frac{1}{3}\omega_0$  до  $\frac{2}{3}\omega_0$  и от  $\frac{2}{3}\omega_0$  до  $\omega_0$  фактически являются «перемешанными», то приходится их объединить и рассматривать совместно, параллельно учитывая и первую, и вторую производные.

## 6. Алгоритмическая основа цифровой обработки сигналов на основе разбиения спектрального интервала на троичные группы

Рассмотрим, как именно информация, получаемая с помощью радиочастотного анализа первой и второй производной, может быть использована для того, чтобы восстановить поведение функции, обладающей  $\varepsilon$ -покрытием, на протяжении на протяжении трех тактов. Оттолкнемся от рисунка 6.1, на котором показаны примеры изменения уровня сигнала на протяжении трёх тактов.

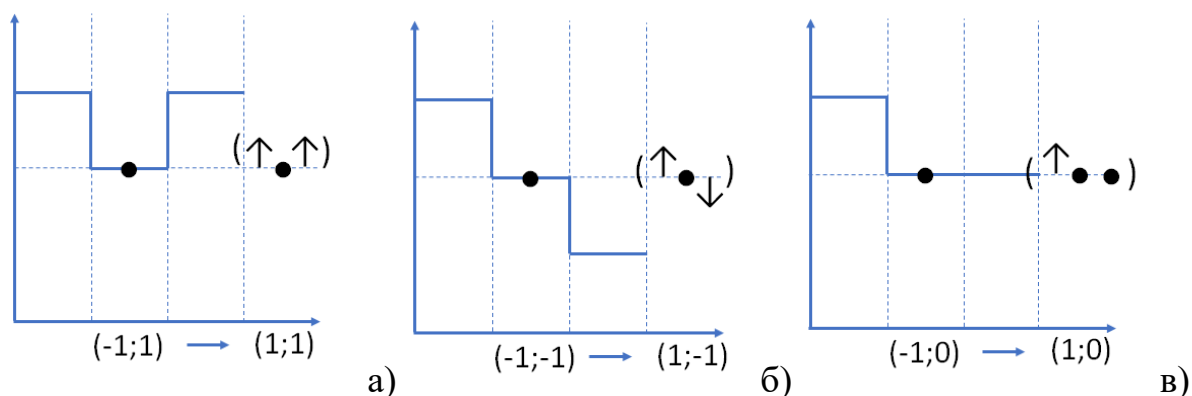


Рисунок 6.1 – Иллюстрация к расшифровке связи между характером кодирующих последовательностей для трехтактного диапазона и знаками первой и второй производной; примеры кодирующих последовательностей  $(-1, 1)$  (а),  $(-1, -1)$  (б) и  $(-1, 0)$  (в)

Данное изменение, очевидно, может быть закодировано в последовательность из двух символов, каждый из которых может принимать значение 1, 0 и  $-1$ .

Данные символы отвечают изменениям уровня сигнала при переходе от первого такта ко второму и от второго к третьему (три возможных частных случая показаны на рис.6.1). На том же рисунке показаны также примеры схем, иллюстрирующих характер отклонения сигнала от центрального такта (правые части рисунков).

Например, первый сигнал, где имеет место изменение сигнала в соответствии с последовательностью  $-1, 1$  схематически представлен чертежом (правая часть рис.6.1 а), на котором имеются две стрелочки, направленные вверх. Это означает, что отклонение сигнала от того значения, которое он принимает на центральном такте положительно и для такта, расположенного слева, и для такта, расположенного справа.

Аналогичным образом на рисунке 6.1.б, показан сигнал, отвечающий последовательности  $-1, -1$ . В этом случае стрелочка слева направлена вверх, то есть сигнал слева превышает сигнал на центральном такте, а стрелочка справа направлена вниз. Аналогичным образом такие схемы можно построить для всех девяти возможных комбинаций. Эти комбинации сведены в таблицу 6.1, где показано также какие знаки при этом должны иметь первая и вторая

производная, чтобы отклонения отвечали направлениям стрелочек, указанных в правых частях представленного рисунка.

Таблица 6.1. Соотношение между символами кодирующей последовательности и знаками первой и второй производной для трехтактного диапазона

Последовательность	Знак при первой производной	Знак при второй производной
$(-1;1)$	0	+1
$(-1;-1)$	-1	0
$(-1;0)$	-1	+1
$(0;1)$	+1	+1
$(0;-1)$	-1	-1
$(0;0)$	0	0
$(1;1)$	+1	0
$(1;-1)$	0	-1
$(1;0)$	+1	-1

Можно видеть, что, как и следовало ожидать из общих соображений теории информации, все девять возможных комбинаций перекрываются возможными комбинациями знаков при первой и второй производной. Девять возможных комбинаций последовательности изменения уровней отвечает девяти возможным комбинациям, значений вторых и первых производных, которым присваивается значение либо +1, либо 0, либо -1.

Именно это соображение и может быть положено в основу цифровой радиотехнической обработки медленно изменяющихся сигналов (точнее, сигналов, обладающих  $\varepsilon$ -покрытием).

А именно, как вытекает из представленных выше соображений, для того, чтобы установить характер изменения сигнала на протяжении трёх выделенных тактов достаточно идентифицировать только знаки первой и второй производных.

При этом, как показывают приведённые выше формулы (5.30) и (5.31), изменение первой производной соответствует синусоидальному сигналу, что отвечает тому, что первая производная на протяжении трех рассматриваемых тактов меняет знак (т.е. описывает антисимметрическую комбинацию уровней). И наоборот, вторая производная отвечает косинусоидальной компоненте или симметричному расположению уровней относительно центрального такта. Комбинации с разными знаками дают все остальные возможные варианты.

Тем самым, разбиение сигналов на частотные полосы позволяет выделять поведение сигнала на протяжении трех тактов с помощью анализа знака сигнала во вполне определенном частотном диапазоне. Очевидно, что для выделения знака косинусоидального и синусоидального сигнала вполне можно пользоваться классическим подходом, основанным на детектировании при помощи радиотехнического вычисления корреляционных интегралов.

Возможная функциональная схема устройства, обеспечивающего идентификацию знаков первой и второй производной на основании анализа характера сигнала в полосе частот от  $\frac{1}{3}\omega_0$  до  $\omega_0$  представлен на рисунке 6.2.

Исходный сигнал поступает на фильтр высоких частот 1, который выделяет сигнал в указанной выше полосе. Сигнал с фильтра высоких частот поступает на детекторы 2 и 3, на другие входы, которых поступает сигнал с генератора гармонического колебания, настроенного на частоту, равную  $\frac{1}{3}\omega_0$ . Точнее, этот сигнал непосредственно поступает на один из смесителей 2, а на другой смеситель он поступает в противофазе для чего используется фазовращатель 5. Детекторы сигналов работают обычным путем, то есть осуществляется умножение выделенного сигнала на гармонический, а далее используется операция интегрирования.

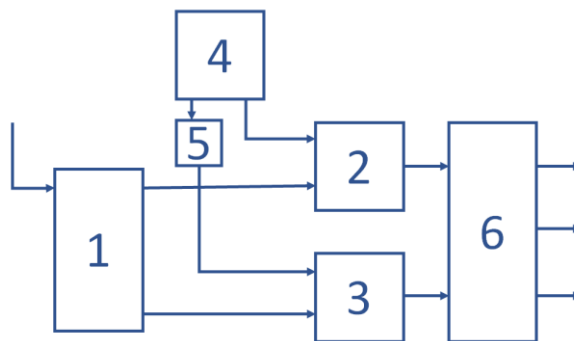


Рисунок 6.2 – Функциональная схема анализатора знака первой и второй производной на основе вычисления

Решение о знаке производной принимается на основании значения интегрального сигнала на протяжении трех тактов с учётом его знака плюс или минус. Если данное значение превышает определенный порог в положительную сторону, то производной приписывается значение +1, если значение сигнала превышает по амплитуде пороговую величину и этот сигнал является отрицательным, то тогда производной приписывается значение -1. Подчеркиваем еще раз, что, как показывает таблица 1, значение производной полностью описывает поведение сигнала в пределах одной совокупности из трех тактов, если известен исходный уровень.

Будем продолжать эту логику. Когда рассматривается последовательность из трех тактов и предполагается, что рассматриваемый сигнал обладает определенным  $\varepsilon$ -покрытием, то тогда исходный уровень сигнала здесь может отличаться только на +1 или -1 от того, который условно можно принять за опорный для данной конкретной последовательности из трех тактов, что и иллюстрирует рисунок 6.1 (центральный такт в системе из трех тактов).

Иными словами, знаки производных при условии, что рассматриваемый сигнал обладает  $\varepsilon$ -покрытием, несут исчерпывающую информацию о поведении



рассматриваемой функции в пределах трех тактов при условии, что известен уровень сигнала, относящийся в тому такту, от которого производится отсчет.

Именно это обстоятельство и подчеркивает представленная выше таблица 6.1. Значение сигнала в пределах трех тактов описывается полностью последовательностью из двух символов, каждый из которых может принимать значение 0, +1 или -1. То же самое можно сказать о производных: если идентифицируется знак первой и второй производной, то здесь мы тоже говорим о последовательности из двух символов, которые также могут принимать указанные значения.

Иными словами, возникает следующая ситуация, если нам известен «базовый» уровень и знаки производных, то дальше сигнал можно реконструировать. Существенно, что сами эти базовые уровни можно рассматривать по той же самой схеме, по которой только что рассматривались уровни, относящиеся последовательности их трех тактов.

Рассматривая последовательность из девяти тактов и исходя из предположения, что рассматриваемый сигнал обладает  $\varepsilon$ -покрытием, мы точно также здесь можно выделять базовые уровни и значения производных, но уже по отношению к трем группам из трех тактов, каждая из которых рассматривается как объемлющий такт (рис.6.3).

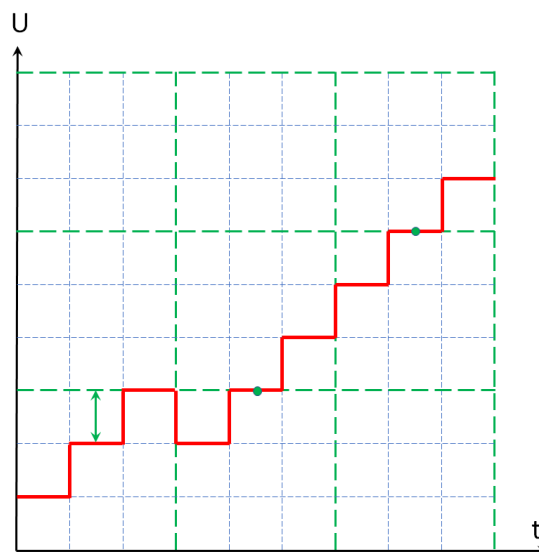


Рисунок 6.3 – Иллюстрация ко второй итерации реконструкции гладкого сигнала по радиочастотному спектру (группа из 9-ти тактов)

Иначе говоря, в рассматриваемой процедуре вариации сигнала применительно к системе их трех тактов относится к анализу спектра в диапазоне частот от  $\frac{1}{3}\omega_0$  до  $\omega_0$ , а сами базовые уровни в каждой совокупности трех тактов относятся к вариациям сигнала для которого эта процедура повторяется.

Применяя эту процедуру снова, интервал частот от 0 до  $\frac{1}{3}\omega_0$  снова нужно поделить в той же самой пропорции. Здесь возникает полоса частот от  $\frac{1}{9}\omega_0$  до  $\frac{1}{3}\omega_0$  (рис.6.4), и именно здесь лежит информация о тех субуровнях, от которых можно отсчитывать сигнал, анализируемого на основании информации о вариациях, связанных с частотным диапазоном от  $\frac{1}{3}\omega_0$  до  $\omega_0$ .

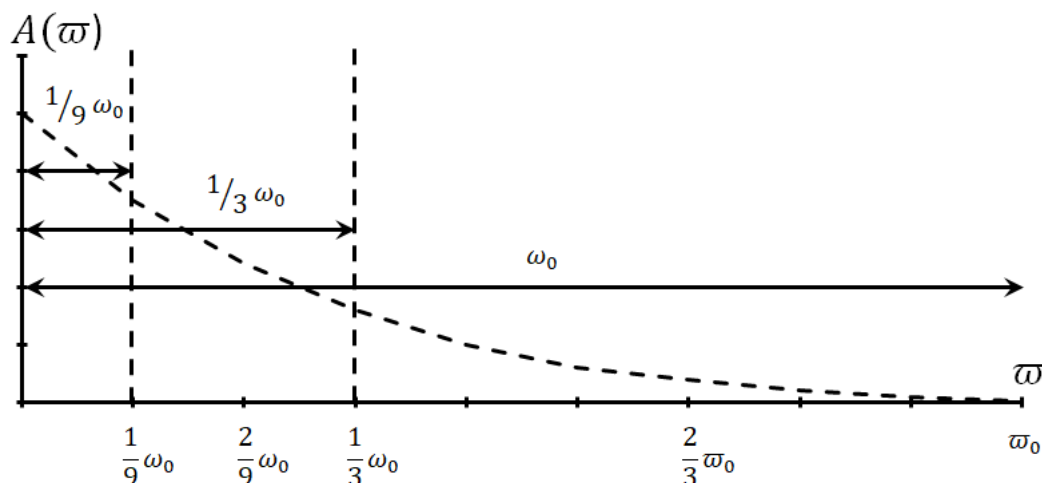


Рисунок 6.4 – Деление спектрального диапазона на полосы частот, отвечающие реконструкции сигнала в группе из 9-ти тактов.

Очевидно, что этот подход можно продолжать и далее, рассматривая группу из 27-ми тактов. Когда рассматриваемый сигнал обладает  $\varepsilon$ -покрытием, то тогда изменения амплитуд между сигналами, заданными между соседними группами из девяти тактов также будет отличаться не более чем на девять исходных «квантов» (шагов дискретности разбиения по уровню сигнала).

Ту же самую процедуру можно повторить, рассматривая три группы тактов, каждый из которых в свою очередь содержит по  $3^3$  такта. Действуя таким образом в итоге, можно прийти к аналогу базиса Уолша с тем отличием, что здесь речь идет не о разбиении, диктуемом степенями двойки, а о разбиении, диктуемом степенями тройки (данный базис рассматривается ниже).

Соответственно, применительно к рассматриваемому вопросу имеет смысл утверждать, что при цифровой обработке сигналов более чем полезным является такое понятие как «трит». Данное понятие сформировано на основании аналогии с понятием бит – единицы измерения количества информации, введенной в широкое употребление на основе двоичной логики, но в данном случае идет речь о единице измерения информации, относящейся к троичной логике.

Будем далее говорить о рассматриваемом процессе в терминах тритов. Этот термин, разумеется не является общеупотребительным, но он является

более чем удобным, потому что для любого сигнала, обладающего  $\varepsilon$ -покрытием, допустимо представление через последовательность тритов.

Другими словами, как это отмечалось выше, для того, чтобы полностью характеризовать сигнал, достаточно знать его начальный уровень и производную на каждом из тактов. При этом, если говорить о сигнале, описываемом через дискретные уровни, под производной, очевидно, понимается информация, заложенная в каждый трит, связывающий значение сигналов на предыдущем и последующим такте.

Таким образом, если говорить в терминах тритов, то тогда любой сигнал, обладающий  $\varepsilon$ -покрытием может быть закодирован совокупностью тритов, чисто которых совпадает с числом тактов (плюс информация об исходном значении сигнала).

Как вытекает из представленных выше соображений, анализ знаков первой и второй производной, который можно провести сугубо радиотехническими средствами, исследуя характер сигнала в полосе частот от  $\frac{1}{3}\omega_0$  до  $\omega_0$ , позволяет получить два трита информации относящейся к группе из трех тактов.

Подчеркиваем, что данная информация является предельной по отношению к предложенному подходу, опирающемуся на разбиение спектра сигнала по полосам частот. Точнее, на первый взгляд могло бы показаться, что можно установить значение первой и второй производной для каждого из тактов и тем самым реконструировать ход изменений сигнала в целом.

Это, однако, запрещено теоремой Котельникова: если рассматривается сигнал, соответствующий полосе частот от  $\frac{1}{3}\omega_0$  до  $\omega_0$ , то тогда он может нести информацию только о поведении первой и второй производной применительно к группе из трех тактов.

Результат, таким образом, состоит в следующем. Анализ первой и второй производной, проведённой в указанной выше полосе частот, позволяет получить два трита информации относительно каждой группы, состоящей из трех тактов. Для того, чтобы реконструировать сигнал полностью не хватает ещё одного трита информации. Этот трит информации можно получить, сопоставляя средние уровни сигналов на протяжении двух соседних групп каждая из которых содержит по три такта.

Как вытекает из представленных выше результатов именно информация о средних уровнях сигналов и оказывается заложенной в частотный диапазон простирающийся от 0 до  $\frac{1}{3}\omega_0$ . Проводя для более протяжённых тактов (точнее, для группы из 9-ти тактов) тот же самый анализ, можно получить еще два трита информации причём каждый из них позволяет реконструировать изменение сигнала на стыке двух групп из трёх тактов внутри группы из 9-ти тактов. В этом случае анализируется поведение сигнала в полосе частот от 0 до  $\frac{1}{9}\omega_0$  и от  $\frac{1}{9}\omega_0$  до  $\frac{1}{3}\omega_0$ . Однако, такой анализ не предоставит информации о скачке между уровнями на стыках групп из 9-ти тактов, т.е. требуется далее разбивать

частотный диапазон от 0 до  $\frac{1}{9}\varpi_0$  в указанной выше пропорции. Иными словами, анализ приведённый выше связанный с разбиением на частотные полосы можно продолжать до тех пор, пока не будет исчерпано множества уровней дискретизации сигнала.

При попытке получить информацию, относящуюся к недостающему (по отношению к группе из трех тактов) триту, о котором говорилось выше, возникает некоторая проблема. А именно, средние уровни сигналов, относящиеся к двум соседним группам, каждая из которых содержит три такта меняются формально дискретным образом, но число таких уровней существенно превышает три. Действительно, если все сигналы формально отвечают +1, то уровень будет соответствовать трем, если один из них принимает значение 0, то к 2 и т.д., т.е. они дискретным образом меняют свои значения от -3 до значения 3. Следовательно, необходимо вполне определенная процедура сравнения, в которую нужно включить информацию о значениях первых производных, полученных при помощи процедуры, описанной выше, и относящейся к двум соседним тактам.

Докажем высказанное выше утверждение математически и попутно покажем, что цифровую обработку сигнала, обладающего  $\varepsilon$ -покрытием можно проводить, используя анализаторы работающий в троичной логике, т.е. соотносящие уровень регистрируемого сигнала с тремя логическими переменными, которым соответствуют величины -1, 0 и +1. Прежде всего отметим, что в соответствии с рисунком 6.5 можно ввести величины, характеризующие недостающий трит следующим образом

$$u_{i+1} + a_{i+1} = \Delta_i + u_i + b_i \quad (6.1)$$

Здесь использованы следующие обозначения. Через  $u_i$  обозначен уровень сигнала, отвечающий среднему такту в каждой группе из трех тактов. Соответственно, через величины  $a_i$  и  $b_i$  обозначены отклонения сигнала на первом и третьем тактах от того значения, которое сигнал принимает на центральном такте в каждой из троек. Эта формула показывает, что действительно существует прямая связь между искомой величиной  $\Delta_i$ , через которую обозначено отклонение сигнала на первом такте в последующей тройке с сигналом на последнем такте в предыдущей тройке. Подчеркиваем, что именно эту величину нужно определить для того, чтобы описать сигнал, имеющий  $\varepsilon$ -покрытие полностью.

Отталкиваясь от формулы (6.1), можно легко перейти к приведенным ниже формулам, которые выражают среднее значение сигнала на протяжении последующей группы из трех тактов и предыдущей группы из трех тактов.

$$\bar{u}_{i+1} = \frac{1}{3}(3u_{i+1} + a_{i+1} + b_{i+1}) \quad (6.2)$$

$$\bar{u}_i = \frac{1}{3}(3u_i + a_i + b_i) \quad (6.3)$$

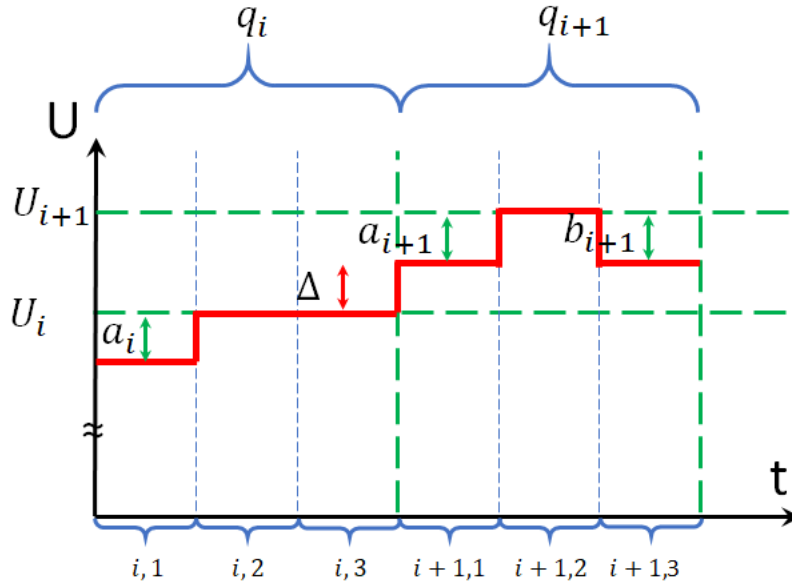


Рисунок 6.5 – Схема, используемая при выводе формулы (33).

Здесь используется обычное вычисление среднего. С радиотехнической точки зрения, эта величина соответствует среднему значению сигнала на протяжении трёх тактов, которая будет получена при условии выполнения соответствующей процедуры фильтрации т.е. на частотном разделение в диапазоне от 0 до  $\frac{1}{3}\omega_0$  и в полосе частот от  $\frac{1}{3}\omega_0$  до  $\omega_0$ .

Вычитая данные соотношения друг из друга, можно прийти к следующей формуле.

$$\bar{u}_{i+1} - \bar{u}_i = u_{i+1} - u_i + \frac{1}{3}(a_{i+1} + b_{i+1} - a_i - b_i) \quad (6.4)$$

Видно, что для того, чтобы определить искомую величину  $\Delta_i$  не обязательно знать выражение для самих значений  $u_i$  и  $u_{i+1}$ , а только разность между ними. Это позволяет воспользоваться формулой (6.1), подставляя которую в (6.4), мы получаем выражение для разности средних значений сигналов на протяжении трех тактов.

$$\bar{u}_{i+1} - \bar{u}_i = \Delta_i + b_i - a_{i+1} + \frac{1}{3}(a_{i+1} + b_{i+1} - a_i - b_i) \quad (6.5)$$

Подчеркиваем, что именно эта разность и определяется экспериментально при разделении исследуемого сигнала на указанные частотные диапазоны. Преобразуя формулу (6.5), легко получить следующее выражение для  $\Delta_i$ .

$$\Delta_i = (\bar{u}_{i+1} - \bar{u}_i) - \frac{2}{3}(b_i - a_{i+1}) - \frac{1}{3}(b_{i+1} - a_i) \quad (6.6)$$

Важно подчеркнуть, что фигурирующие в формуле (6.6) разности  $b_i$  и  $a_{i+1}$  и  $b_{i+1}$  и  $a_i$  могут принимать значения от -2 до 2. Другими словами, последние два слагаемых в этой формуле могут менять значение в промежутке от -1 и до +1. Фактически эта формула показывает, что можно оперировать сравнением наблюдаемой разности средних значений, взятых на протяжении предыдущих и последующих трех тактов и значениями, которые получены при радиотехнической обработке первой и второй производных.

При условии, что записанная в правой части формулы (6.6) комбинация будет превышать соответствующие пороговые значения, ей следует приписывать значение -1, 0 или +1. Таким образом, эта формула исчерпывает описание цифровой обработки сигналов с помощью разделения на частотные диапазоны по отношению к группам из 9-ти тактов.

Подчеркиваем, она, разумеется, справедлива только для сигналов, обладающих  $\varepsilon$ -покрытием, но данная ситуация является достаточно распространенной, как это и отмечалось выше. Фактически, любые сигналы, на скорость изменения которых наложены определенные ограничения, могут рассматриваться как сигналы, обладающие  $\varepsilon$ -покрытием.

Уместно подчеркнуть, что разности между усредненными величинами, относящимися к группам из трех тактов, то есть  $\bar{u}_{i+1}$  и  $\bar{u}_i$ , могут быть получены при помощи той же самой процедуры, что была описана выше, но только для другого частотного диапазона (от  $\frac{1}{9}\omega_0$  до  $\frac{1}{3}\omega_0$ ).

Именно в этом смысле мы и говорим о второй итерации частотного радиотехнического анализа сигналов, обладающих  $\varepsilon$ -покрытием. Эту разность можно получить, выделяя сигналы, соответствующие первой и второй производной, при анализе группы из 9-ти тактов.

Разбиение ее на три тройки и повторение для нее той же самой процедуры, что и для групп из трех тактов, позволяет получить указанные выше значения  $\bar{u}_{i+1}$  и  $\bar{u}_i$  тем же самым способом, с помощью которого можно реконструировать отклонение сигнала от значения на центральном такте применительно к тройке тактов.

Соответственно для целей реконструкции сигнала, обладающего  $\varepsilon$ -покрытием при числе уровней дискретизации, равном 9, можно использовать следующую радиотехническую схему (рис. 6.6).

Данная схема основывается не на вычислении корреляционных интегралов, а на классической процедуре демодуляции, позволяющей перейти к использованию фильтров низких частот. Действительно, как было показано выше, для вычисления знаков первой и второй производной, фактически нужно получить сигнал на частотах  $\frac{2}{3}\omega_0$  и  $\frac{2}{9}\omega_0$ , выделив его из исходного.

Для этого оптимальной является процедура демодуляции. Соответственно, в данной схеме исходный сигнал подается на два смесителя 1 и 2, на которые также подается гармонический сигнал, формируемый генератором 3 в фазе на

смеситель 1 и в противофазе на смеситель 2. Для того, чтобы обеспечить формирование сигнала в противофазе используется фазовращатель 4.

Аналогичная схема применяется по отношению к сигналу на частоте  $\frac{2}{9}\omega_0$ . Здесь исходный сигнал подаётся на смесители 5 и 6 и на них же подается сигнал от генератора синусоидального колебания 7 также в фазе и в противофазе. Противофазный сигнал также формируется при помощи фазовращателя 8. После всех указанных смесителей стоят фильтры низких частот 9, 10, 11 и 12.

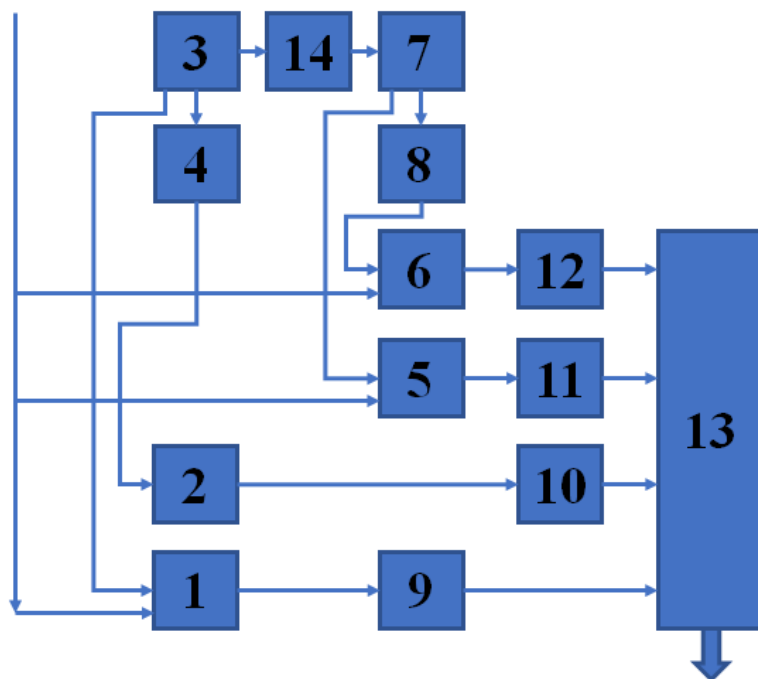


Рисунок 6.6 – Функциональная схема системы цифровой обработки сигнала при числе уровней дискретизации, равном 9.

Фильтры 9 и 10 в совокупности со смесителями формируют стандартный демодулятор, позволяющий выделить сигнал на частоте  $\frac{2}{3}\omega$ , переводя его в низкочастотную область в соответствии с процедурой, классической для радиоэлектроники. Аналогичным образом работают цепочки, составленные из смесителей и фильтров низких частот для сигнала на частоте  $\frac{2}{9}\omega$ . Синхронизация работы генераторов гармонических сигналов обеспечивается блоком 14, в состав которого входит делитель частоты.

Указанная схема позволяет получить исчерпывающую информацию, необходимую для восстановления сигнала, обладающего  $\varepsilon$ -покрытием при числе уровней дискретизации, равном 9. Для большего числа уровней число блоков обработки сигналов должно быть, очевидно, увеличено.

Фактически здесь идёт о том, что выделяются сигналы на частоте  $\frac{2}{3}\omega_0$  и  $\frac{2}{9}\omega_0$ . Далее эти сигналы передаются на блок, обеспечивающий

соответствующие вычислительные процедуры. В простейшем случае (точнее, в случае простейшем с точки зрения наглядности описания работы) данный узел представляет собой систему компараторов, где уровень сигнала на выходе фильтров низких частот 9, 10, 11 и 12 сравнивается с эталонными значениями и в соответствии с этим принимаются решения о знаке первой и второй производных для систем тактов из трех и из девяти. Однако, дальнейшие непосредственные вычисления, которые требуют написания достаточно сложной программы.

Альтернативным вариантом является использование нейронных сетей, которые могут быть обучены для того, чтобы сформировать необходимые значения сигналов, позволяющие полностью реконструировать исходный сигнал.

Уместно также отметить, что рассматриваемый подход допускает вполне определенное обобщение на цифровую обработку сигналов, которые не обязательно априори удовлетворяют существованию  $\varepsilon$ -покрытия. Для того чтобы воспользоваться предложенным подходом, собственно говоря, достаточно, чтобы сигнал был малым в смысле возможности разложения описывающего функции в ряд Тейлора на протяжении трёх тактов. Действительно, если разложение в ряд Тейлора справедливо, то тогда мы можем описать функцию на протяжении трех тактов, пользуясь формулой (5.31).

При это абсолютно неважно каким именно способом была получена информация о характере первой и второй производной, в частности её можно получить из анализа поведения сигнала в полосе частот от  $\frac{1}{3}\omega_0$  до  $\omega_0$ .

Другими словами, возникает возможность существенно снизить количество операций, необходимых для оцифровки сигнала. Если сигнал является медленно изменяющимся, то диапазон изменения сигналов, отвечающих второй и первой производной, будет намного ниже, чем весь диапазон амплитуд.

В следующей главе этот вывод обобщается, причем доказывається, что при переходе к использованию полей Галуа операция цифрового дифференцирования, которая де-факто используется при троичной обработке сигналов, в спектральном представлении представима через передаточную функцию, что существенно упрощает алгоритмы их обработки.



## 7. Дальнейшее совершенствование методов обработки медленно изменяющихся сигналов

Проложим пользоваться сопоставлением представления значения сигнала в пределах последовательности из нескольких тактов через ряд Фурье и через ряд Тейлора. Такой подход фактически был реализован в предыдущей главе для случая, когда число тактов равно трем. В данной главе этот подход обобщается на произвольное нечётное число тактов.

Снова оттолкнемся от представления медленно изменяющегося сигнала через ряд Тейлора

$$u(t_i \pm \Delta t) = u(t_i) + \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=t_i} \Delta t + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 u}{dt^2} \right|_{t=t_i} (\Delta t)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \left. \frac{d^n u}{dt^n} \right|_{t=t_i} (\Delta t)^n \quad (7.1)$$

Будем считать, что рассматриваемый сигнал лежит в конечной полосе частот. Тогда, в соответствии с теоремой Котельникова, вместо него можно рассматривать последовательность дискретных отчетов, или, что то же самое, рассматривать последовательность тактов – дискретных интервалов времени, в пределах которых сигнал рассматривается как приближенно постоянный. Разобьём эти такты на группы по  $M$ , где  $M$  – нечетное число.

Выберем в последовательности, содержащей нечетное число тактов, центральный такт (рис.7.1), что можно сделать так как  $M$  нечетно.

Если сигнал, относящийся к выбранной группе тактов, является медленно изменяющимся, то разложение в ряд Тейлора может быть применено к моменту времени, относящемуся к центральному такту, то есть данное разложение описывает поведение сигнала во всей рассматриваемой группе.

Обратим теперь внимание на принципиально важное обстоятельство. Функция  $u(t)$ , описывающая сигнал, равно как и ее производные в формуле (7.1) являются функциями времени. При использовании разбиения на группы тактов по  $M$ , можно считать, что и эта функция, и ее производные относятся только к центральным тактам данной последовательности, т.е. их также можно выбирать в дискретных отсчетах, причем частота следования таких отчетов в  $M$  раз меньше, нежели частота следования отсчётов, определяемая полосой частот, в которой данный сигнал сосредоточен.

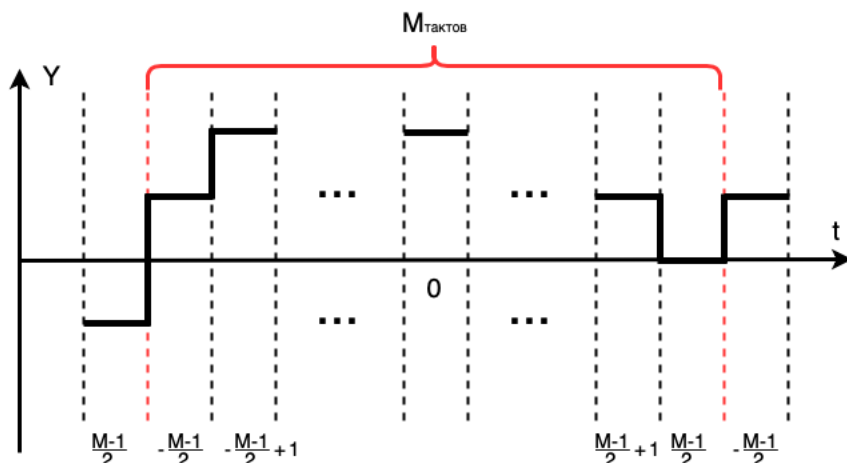


Рисунок 7.1 – К использованию ряда Тейлора при описании сигнала в пределах группы тактов.

Отсюда, в частности, вытекает минимальное число членов ряда (7.1), которое необходимо для восстановления цифрового сигнала при помощи такого разложения.

А именно вместо одной функции, несущей информацию в отсчетах, отстоящих друг от друга на  $\Delta t$ , можно использовать  $M$  функций, заданных в отсчетах, отстоящих друг от друга на  $\Delta t/M$ . Полное число отсчетов при этом, очевидно, не изменится, что и позволяет установить соответствие между представлениями через классическую теорему Котельникова и через ее предлагаемое обобщение (или, что то же самое, через ряд Фурье и через ряд Тейлора). Преимущество предлагаемой нами модификации, подчеркиваем это, состоит не в уменьшении числа необходимых для восстановления сигнала отсчетов, а в том, что предлагаемая модификация позволяет учесть специфику медленно изменяющихся сигналов, а на следующем шаге – перейти к использованию полей Галуа для их обработки.

Таким образом, для описания сигнала в пределах  $M$  тактов следует пользоваться рядом Тейлора, в который входит  $M - 1$  производных.

Проведем сопоставления указанных выше представлений по той же методике, что и в предыдущей главе.

Снова воспользуемся представлением сигнала через интеграл Фурье

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\omega_0} \exp(i\omega t) A(\omega) d\omega \quad (7.2)$$

где  $\omega$  – круговая частота,  $A(\omega)$  – спектр сигнала,  $\omega_0$  – пороговая круговая частота.

Разобьём диапазон изменения круговой частоты от  $-\omega_0$  до  $\omega_0$  на поддиапазоны в соответствии с рис.7.2. На данном рисунке используется обозначение  $\Omega = \frac{\omega_0}{M}$ .

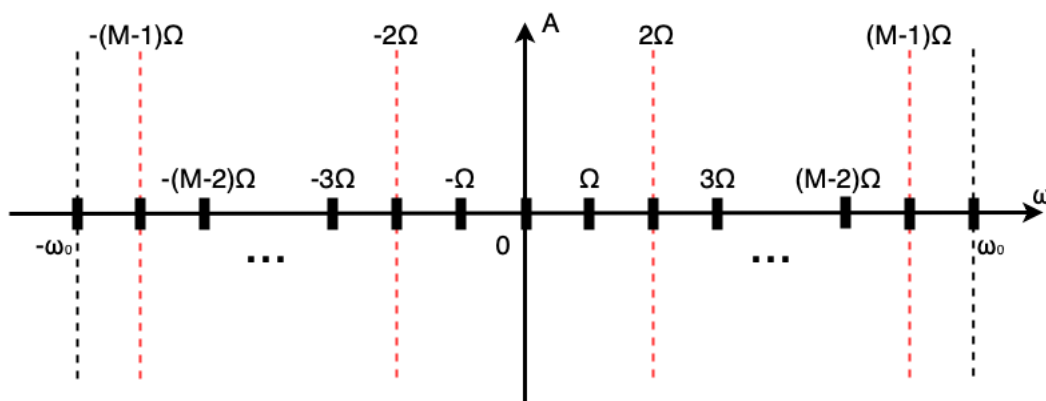


Рисунок 7.2 – Разбиение диапазона изменения круговой частоты от  $-\omega_0$  до  $\omega_0$  на поддиапазоны

Данное разбиение осуществлено следующим образом. Протяженность всего рассматриваемого диапазона составляет  $2\omega_0$  по шкале круговых частот, соответственно протяженность каждого из  $M$  поддиапазонов составляет в точности  $2\Omega$ . Особое положение занимает центральный поддиапазон, который лежит в пределах от  $-\Omega$  до  $\Omega$  по шкале круговых частот. Далее вправо и влево от него идут остальные поддиапазоны протяженностью  $2\Omega$  каждый. Соответственно центры всех поддиапазонов приходятся на значения частот  $2m\Omega$ . Пример разбиения для случая  $M = 5$  для наглядности представлен на рис. 7.3.

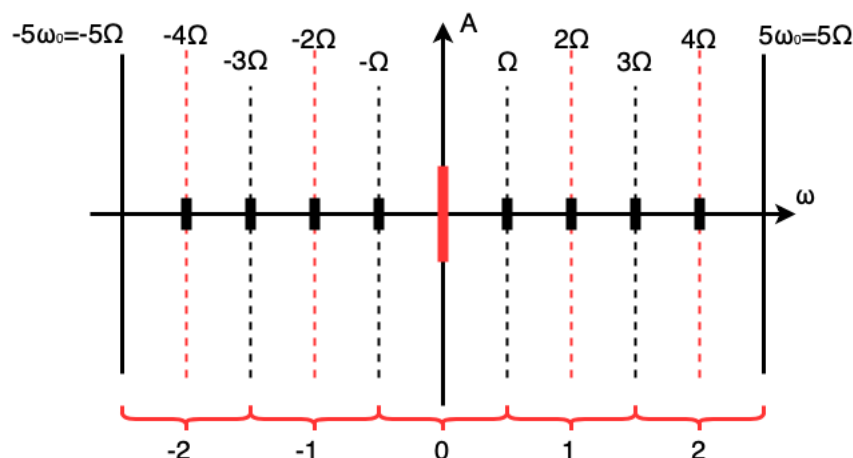


Рисунок 7.3 – Пример разбиения частотной полосы на поддиапазоны для случая  $M = 5$

Интеграл (7.2) при разбиении диапазона интегрирования на указанные выше поддиапазоны будет, очевидно, содержать  $M$  слагаемых, причем каждое из них может быть записано в виде

$$u_k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{k(1-\Omega)}^{k(1+\Omega)} \exp(i\omega t) A(\omega) d\omega, \quad k = -\frac{M-1}{2}, \dots, \frac{M-1}{2} \quad (7.3)$$

Соответственно,

$$u(t) = \sum_{k=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} u_k(t), \quad k = -\frac{M-1}{2}, \dots, \frac{M-1}{2} \quad (7.4)$$

Действуя по той же методике, что и в предыдущей главе, т.е. вынося из-под знака интеграла множитель  $\exp(ik\Omega t)$  и делая замену переменных, получаем, что рассматриваемый сигнал представим в виде

$$u(t) = U_0(t) + \sum_{k=1}^{\frac{M-1}{2}} U_k^+(t) \cos(k\Omega t) + U_k^-(t) \sin(k\Omega t), \quad (7.5)$$

где функции  $U_0(t)$  и  $U_k^\pm(t)$  имеют спектр, ограниченный верхним значением частоты  $\Omega$ .

Данные функции выражаются через функции, получаемые из интегралов (7.3) по указанной выше методике, т.е.

$$u_k(t) = \exp(i\omega t) \frac{1}{2\pi} \int_{-\Omega}^{\Omega} \exp(i\omega t) A(\omega - k\Omega) d\omega, \quad (7.6)$$

Впрочем, конкретная связь с комплексным представлением спектра не играет определяющего значения с точки зрения практических применений: важно только то, что существует возможность выразить функцию, описывающую сигнал через ряд, функции, входящие в который имеют ограниченный спектр, лежащий в полосе в  $M$  раз более узкой, нежели исходная.

Существенно, что в силу ограниченной полосы частот, в которой сосредоточен сигнал, формулу (7.5) де-факто можно применять только по отношению к дискретным отсчетам, т.е. в пределах конкретной группы из  $M$  тактов

$$u_{sj} = U_{0s} + \sum_{k=1}^{\frac{M-1}{2}} U_{ks}^+ \cos(k\Omega(j\Delta t)) + U_{ks}^- \sin(k\Omega(j\Delta t)), \quad (7.7)$$

где  $j = -\frac{M-1}{2}, \dots, \frac{M-1}{2}$ .

Выбор нумерации связан с тем, что номера тактов внутри группы отсчитываются от центрального, рис.7.1.

Далее, интервалы  $\Delta t$  определяются базовой граничной частотой  $\omega_0$ . Конкретно, между ними существует связь, даваемая непосредственно теоремой Котельникова

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{2\Delta t} = \frac{\pi}{\Delta t} \quad (7.8)$$

Или

$$\Omega = \frac{\pi}{M\Delta t} \quad (7.9)$$

Из формулы (7.9) вытекает, что в выражение (7.7) де-факто входят только вполне определенные числовые значения, справедливые для любых сигналов.

$$u_{sj} = U_{0s} + \sum_{k=1}^{\frac{M-1}{2}} U_{ks}^+ \cos\left(\frac{\pi}{M} kj\right) + U_{ks}^- \sin\left(\frac{\pi}{M} kj\right), \quad (7.10)$$

К виду, содержащему только численные коэффициенты, можно также привести и выражение для ряда Тейлора, для этого достаточно перейти к безразмерной переменной времени, определяемой как

$$x = \frac{t}{\Delta t} \quad (7.11)$$

Тогда

$$u_{sj} = u_{0s} + \left. \frac{du}{dx} \right|_{x=x_s} j + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2u}{dx^2} \right|_{x=x_s} j^2 + \dots + \frac{1}{n!} \left. \frac{d^nu}{dx^n} \right|_{x=x_s} j^n \quad (7.12)$$

В выделенной группе тактов имеется  $M$  значений дискретных отсчетов. В соответствии с формулой (7.10) они выражаются через  $M = 1 + 2 \frac{M-1}{2}$  величин, полученных при разбиении полосы частот на  $M$  поддиапазонов.

Следовательно, если использовать струю ряда Тейлора, содержащую также  $M$  величин (т.е. вплоть до производной порядка  $M - 1$ ), то указанные производные могут быть выражены через функции  $U_0(t)$  и  $U_k^\pm(t)$ . Для этого достаточно приравнять значения сигнала на каждом из  $M$  тактов, даваемых формулами (7.10) и (7.12).

Для наглядности рассмотрим конкретный пример, когда  $M = 5$ .

В этом случае формула (7.10) приобретает вид

$$u_{sj} = U_{0s} + U_{1s}^+ \cos\left(\frac{\pi}{5} j\right) + U_{1s}^- \sin\left(\frac{\pi}{5} j\right) + U_{2s}^+ \cos\left(\frac{\pi}{5} 2j\right) + U_{2s}^- \sin\left(\frac{\pi}{5} 2j\right), \quad (7.13)$$

Откуда

$$u_{s0} = U_{0s} + U_{1s}^+ + U_{2s}^+, \quad (7.14)$$

$$u_{0s} + \sum_{n=1}^{n=5} \frac{1}{n!} \frac{d^n u}{dx^n} \Big|_{x=x_s} =$$

$$= U_{0s} + U_{1s}^+ \cos\left(\frac{\pi}{5}\right) + U_{1s}^- \sin\left(\frac{\pi}{5}\right) + U_{2s}^+ \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) + U_{2s}^- \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) \quad (7.15)$$

$$u_{0s} + \sum_{n=1}^{n=5} \frac{1}{n!} \frac{d^n u}{dx^n} \Big|_{x=x_s} 2^n =$$

$$= U_{0s} + U_{1s}^+ \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) + U_{1s}^- \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) + U_{2s}^+ \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) + U_{2s}^- \sin\left(\frac{4\pi}{5}\right) \quad (7.16)$$

$$u_{0s} + \sum_{n=1}^{n=5} \frac{1}{n!} \frac{d^n u}{dx^n} \Big|_{x=x_s} (-1)^n =$$

$$= U_{0s} + U_{1s}^+ \cos\left(\frac{\pi}{5}\right) - U_{1s}^- \sin\left(\frac{\pi}{5}\right) + U_{2s}^+ \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) - U_{2s}^- \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) \quad (7.17)$$

$$u_{0s} + \sum_{n=1}^{n=5} \frac{1}{n!} \frac{d^n u}{dx^n} \Big|_{x=x_s} (-2)^n =$$

$$= U_{0s} + U_{1s}^+ \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) - U_{1s}^- \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) + U_{2s}^+ \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) - U_{2s}^- \sin\left(\frac{4\pi}{5}\right) \quad (7.18)$$

В формулы (7.14) – (7.15) входят пять величин, которые, строго говоря, могут быть получены сугубо радиотехническими методами - функции  $U_0(t)$  и  $U_k^\pm(t)$ , которые можно получить, выделяя составляющие сигнала в соответствующих спектральных поддиапазонах. Соответственно, значения производных по четвертую включительно может быть выражено через величины, получаемые радиотехническим путем. Радиотехническое дифференцирование функции может быть осуществлено через процедуру спектральной фильтрации. Несколько забегаю вперед, отметим, что такая процедура дифференцирования становится наиболее простой и удобной при использовании представлений сигнала через поля Галуа.

Формулы (7.14) – (7.18) допускают дальнейшее упрощение, в частности, можно воспользоваться тем обстоятельством, что функция косинуса является четной, а синуса – нечетной. В этом, однако, на данном этапе рассуждений нет необходимости, поскольку необходимые для разработки предлагаемых алгоритмов выводы могут быть сделаны и на основе качественного анализа полученных соотношений. Важно, что для медленно изменяющихся сигналов, т.е. таких, для которых справедливо представление через ряд Тейлора в пределах определённой группы тактов, разбиение радиочастотного спектрального диапазона на подинтервалы позволяет установить значения сигналов в данных полосах частот (парциальных сигналов) со значениями производных.

Покажем, что для цифровой обработки с предложенной точки зрения весьма эффективным инструментом становятся поля Галуа.

Вернемся к рассмотрению случая, когда  $M = 3$ . Качественно полученные результаты можно трактовать следующим образом (рис.7.4.).

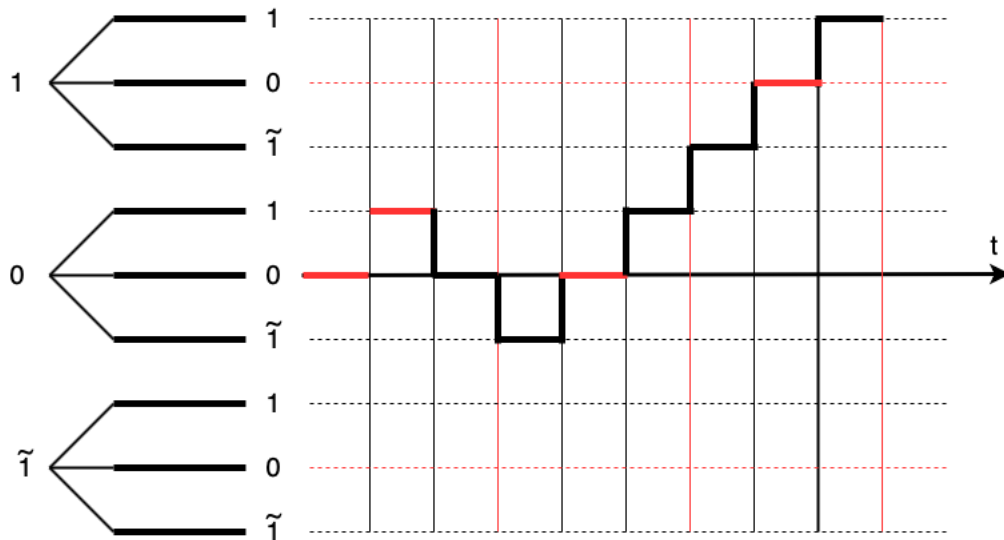


Рисунок 7.4 – Соответствие представления сигнала в троичной кодировке и парциальным сигналам, относящимся к различным полосам частот.

Обратим внимание на следующее обстоятельство. Для медленно изменяющихся сигналов (точнее, сигналов, обладающих  $\varepsilon$ -покрытием в смысле, использованном в предыдущей главе) наиболее естественным представлением является именно троичное, точнее, предложенное в [84].

Действительно, для такого сигнала разность между значениями на последующем и предыдущем тактах может составлять только -1, 0 или 1, что и соответствует полю Галуа  $GF(3)$ , а также троичной логике.

В такой логике любое целое число (в том числе и отрицательные числа) могут быть записаны в следующей форме

$$a \dots bc \leftrightarrow a \cdot 3^n + \dots + b \cdot 3^1 + c \cdot 3^0 \quad (7.19)$$

где буквенные обозначения отвечают одному из элементов поля Галуа  $GF(3)$ , содержащего три элемента  $(-1, 0, 1)$ .

В соответствии с этим правилом, троичное число преобразуется в десятичное. Пример такого преобразования для конкретной комбинации символов троичной логики дается следующей записью:

$$1\tilde{1}01 \leftrightarrow 1 \cdot 3^3 - 1 \cdot 3^2 + 0 \cdot 3^1 + 1 \cdot 3^0 = 27 - 9 + 1 = 35 \quad (3.20)$$

Где для удобства записи введено обозначение

$$-1 \leftrightarrow \tilde{1} \quad (3.21)$$

Рисунок 7.4. иллюстрирует весьма важно обстоятельство, которое вытекает из рассматриваемого обобщения теоремы Котельникова. А именно, для

сигнала, обладающего  $\varepsilon$ -покрытием, троичное представление позволяет отчётливо разделить полосы, отвечающие различным парциальным сигналам, которые де-факто становятся сигналами, отвечающие различным разрядам троичного числа.

Действительно, как показывает предложенное обобщение теоремы Котельникова, можно восстанавливать сигнал, отталкиваясь от его значения на такте, являющемся центральным для соответствующей группы тактов. Применительно к естественному использованию троичной логики число таких тактов также равно трем.

Примем также во внимание, что в троичной форме записи числа значение сигнала на центральном такте также может рассматриваться как сумма сигнала, отвечающего старшему разряду и вариации, отвечающей младшему.

Иными словами, для такого сигнала вся информация о младшем разряде (точнее, о его зависимости от времени) укладывается в последовательность троичных символов. Точно такое же рассуждение справедливо для группы из 9 тактов, точнее для центральных тактов трех групп по три такта. Описывающий их сигнал соответствует следующему разряду троичного числа и т.д.

Фактически, получается, что радиочастотные спектральные поддиапазоны соответствуют различным разрядам троичных чисел, что и определяет широкие возможности для практического использования такого представления, особенно для обработки экспериментальных данных, где медленное изменение сигнала гарантируется самой природой исследуемого объекта. К таким сигналам, в частности, относятся сигналы, получаемые при построении фазовых портретов реальных физико-химических систем, а также при измерениях вязкости, которые рассматриваются в следующем разделе.

Подчеркнем, что троичное представление, разумеется, не является единственным, в котором может быть использован предлагаемый подход.

В частности, как отмечалось выше, существует возможность разбить частотный диапазон, в котором сосредоточен спектр рассматриваемого сигнала, на пять поддиапазонов. В этом случае составляющие спектра, относящиеся к центральному поддиапазону, будут определять поведение сигнала на центральных тактах в группах по пять тактов. Это пятеричному представлению целых чисел и пятеричной логике (рис. 7.5).



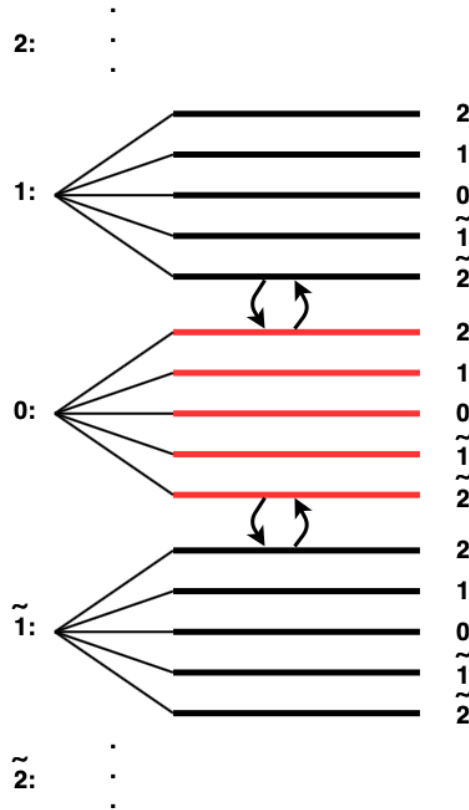


Рисунок 7.5 – Уровни сигнала при использовании поля Галуа  $GF(5)$ , отвечающие пятеричному представлению целых чисел и пятеричной логике.

Таким образом, перспективы применения троичной логики для цифровой обработки сигналов действительно достаточно велики. Покажем, что для троичной логики можно также сформировать аналоги базиса Уолша, который широко используется в современных информационных технологиях [85-87]. В литературе известны также различные его модификации, например, [88,89].

В главе 3 было использовано представление поля Галуа в форме, содержащей  $\pm 1$ . Такое представление удобно, в частности, тем, что оно позволяет непосредственно использовать матрицы, порождающие аналоги базиса Уолша для многозначных логик.

Покажем это. Одной из основных форм отыскания функций, составляющих базис Уолша, являются матрицы Адамара, которые строятся рекурсивным методом по следующей схеме.

$$\hat{H}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, \quad (3.22)$$

$$\hat{H}_{2^{m+1}} = \begin{pmatrix} \hat{H}_{2^m} & \hat{H}_{2^m} \\ \hat{H}_{2^m} & -\hat{H}_{2^m} \end{pmatrix}. \quad (3.23)$$

Будем считать, что матрицы (3.22) заданы над некоторым полем Галуа, в состав которого входят элементы  $\pm 1$ . Рассмотрим произведение матрицы (2.22) саму на себя

$$\hat{H}_2^2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+1 & 0 \\ 0 & 1+1 \end{pmatrix} = (1+1)^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Следовательно, матрица  $\hat{H}_2$  с точностью до множителя совпадает с обратной к себе самой, причем этот вывод справедлив для любого поля Галуа в состав которого входят элементы  $\pm 1$ .

Рассмотрим следующий шаг, т.е. произведение матрицы  $\hat{H}_4$  саму на себя

$$\hat{H}_{2^2} \hat{H}_{2^2} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Прямым вычислением получаем

$$\hat{H}_{2^2} \hat{H}_{2^2} = A_{2^2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.26)$$

где  $A_{2^2} = (1 + 1 + 1 + 1)^2$ .

В последнем выражении фигурируют именно суммы единиц, так как результат сложения зависит от того, какое именно поле Галуа рассматривается. Так, если речь идет о поле  $GF(17)$ , то  $A_{2^2} = 16$ , если же о поле  $GF(3)$ , то  $A_{2^2} = 1$ .

Результат (3.26) можно получить, и рассматривая матрицу  $\hat{H}_{2^2}$  как блочную. Более того, непосредственно умножая

$$\hat{H}_{2^{1+m}} \hat{H}_{2^{1+m}} = \begin{pmatrix} \hat{H}_{2^m} & \hat{H}_{2^m} \\ \hat{H}_{2^m} & -\hat{H}_{2^m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{H}_{2^m} & \hat{H}_{2^m} \\ \hat{H}_{2^m} & -\hat{H}_{2^m} \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

получаем

$$\hat{H}_{2^{1+m}} \hat{H}_{2^{1+m}} = \begin{pmatrix} \hat{H}_{2^m} + \hat{H}_{2^m} & 0 \\ 0 & \hat{H}_{2^m} + \hat{H}_{2^m} \end{pmatrix} = 4A_{2^m} \hat{I} \quad (3.28)$$

Применяя математическую индукцию, имеем

$$\hat{H}_{2^{1+m}} \hat{H}_{2^{1+m}} = A_{2^{m+1}} \hat{I} \quad (3.29)$$

где

$$A_{2^{m+1}} = 2^{2^{m+2}} \quad (3.30)$$

Подчеркиваем, что запись (3.30) в полях Галуа, строго говоря, является условной. Корректно ее следует записать как

$$A_{2^{m+1}} = 1 + 1 + \dots + 1, \quad (3.31)$$

где число единиц - слагаемых в правой части равно  $2^{2^{m+2}}$ .

Результат сложения, очевидно, зависит от того, какое именно поле Галуа используется. Так, при  $m = 3$  в поле  $GF(17)$  в использованном выше представлении будет иметь место  $A_{2^{m+1}} = -1$ . Впрочем, символической записью также удобно пользоваться, например, для таких полей как  $GF(17)$ . В этом поле группа степеней двойки является циклической, и имеет место:

$$2^2 = 4, 2^3 = 8, 2^4 = -1, 2^5 = -2, 2^6 = -4, 2^7 = -8, 2^8 = 1$$

Отсюда, в частности, вытекает, что удобно использовать сигналы, разбиваемые по времени на группы по 16 тактов. В этом случае  $m = 7$  и  $A_{2^{m+1}} = 1$ , т.е. матрица, обратная к  $\hat{H}_{2^8}$  в точности совпадает с нею самой.

$$\hat{H}_{2^8} \hat{H}_{2^8} = \hat{I} \quad (3.32)$$

Тем самым, мы доказали, что операцию

$$\vec{f} = \hat{H}_{2^{1+m}} \vec{u} \quad (3.33)$$

можно интерпретировать как вычисление спектра оцифрованного сигнала, причем амплитуды компонент данного спектра представляют собой элементы поля Галуа.

Переход от спектрального представления к исходному сигналу дается обратным преобразованием

$$\vec{u} = (\det \hat{H}_{2^{m+1}})^{-1} \hat{H}_{2^{1+m}} \vec{f} \quad (3.34)$$

причем существенно, что  $(\det \hat{H}_{2^{m+1}})^{-1}$  представляет собой элемент поля Галуа, обратный к  $\det \hat{H}_{2^{m+1}}$  в смысле операции умножения именно в данном конкретном поле.

Для наглядности соотношение (3.34) удобно представить в виде

$$\vec{u} = \sum_i f_i \vec{W}_i, \quad (3.35)$$

где вектора  $\vec{W}_i$  с точностью до постоянного множителя совпадают со столбцами матриц Адамара, порождающими базис Уолша (или строками, если матрицы действуют на вектора справа).

Именно это обстоятельство и позволяет интерпретировать представление (3.35) как спектральное.

Перейдем теперь к рассмотрению конкретных ситуаций, которые показывают, как именно методами, связанными с обработкой медленно изменяющихся сигналов, можно пользоваться на практике. Более того, как будет ясно из дальнейшего, возможности их применения оказываются гораздо шире, чем это может показаться на первый взгляд.

Ключом к доказательству этого утверждения является метод фазовых портретов, который рассматривается в следующей главе.

## **8. Радиотехнический метод определения температуры фазового перехода в растворах термочувствительных полимеров**

Как было показано в работах [72,90,91], фазовые портреты зависимостей мутности растворов полимеров от того или иного управляющего параметра, несут в себе важнейшую информацию о процессах, которые в этом растворе происходят. В частности, именно методом фазовых портретов можно выявить стадийный характер процесса формирования интерполимерных комплексов [70], что является более чем важным с точки зрения изучения процессов самоорганизации в таких системах и, шире, с точки зрения установления механизмов эволюции, предшествовавшей биологической [70].

Есть все основания полагать, что тот же самый инструмент можно использовать и для исследования особенности фазовых переходов при изменении температуры.

Такие фазовые переходы характерны для термочувствительных полимеров, которые являются одним из важнейших классов гидрофильных макромолекул [92]. Их изучение представляет значительный интерес и в академическом плане (например, с точки зрения изучения гидрофобно-гидрофильного баланса, определяющего растворимость сополимеров сложного состава [93]), и в сугубо прикладном аспекте, в том числе, с точки зрения использования новых полимерных материалов в радиотехнике и радиоэлектронике. В частности, в работах [94,95] было показано, что на основе термочувствительных полимеров могут быть реализованы новые системы отображения информации.

Фазовый переход, который испытывают термочувствительные полимеры при вариациях температуры раствора является одним из их важнейших свойств; такие переходы изучались во многих работах [96-98]. На сегодняшний день твердо установлено, что характер фазового перехода для различных термочувствительных полимеров может сильно различаться. В частности, от полимера к полимеру существенно варьируется ширина переходной области по температурной шкале, в которой сосуществуют и макромолекулы, потерявшие растворимость, и продолжающие оставаться в растворе. Тот факт, что переходный температурный интервал может быть достаточно протяженным, приводит ко вполне определенным затруднениям, связанным с определением температуры фазового перехода. Различного рода графические построения, иногда используемые для этой цели, приводят к заметным ошибкам, иногда и систематическим.

В данной главе для наглядности рассматриваются простейшие типы фазовых портретов (точнее, системы, которые отвечают таким портретам), а, также рассматривается радиоэлектронная схема, которая позволяет обеспечить автоматическое получение фазовых портретов кривых зависимости мутности раствора от температуры. Простейший тип фазовых портретов был использован также в [99].

На данном этапе со всей определенностью можно утверждать, что термочувствительные полимеры по своим характеристикам достаточно сильно

варьируются. В частности, от полимера к полимеру существенно изменяется тот температурный диапазон, в котором происходит фазовый переход. Этот диапазон характеризуется вполне определенной протяженностью по температурной шкале, точнее уместно говорить о резкости фазового перехода.

Данная характеристика представляется также весьма важной поскольку оно также несет в себе информацию о характере внутримолекулярных взаимодействий, который приводит к потере растворимости макромолекулы (фазовый переход, внешним проявлением которого является помутнение раствора обусловлен именно потерей растворимости).

Очевидно, что наличие достаточно широкой переходной зоны говорит о том, что процесс потери растворимости носит вероятностный характер. Он описывается статистически и поэтому определение критической температуры фазового перехода представляет определенные трудности. В литературе описан целый ряд графических построений, которые могут дать указанное значение, но все они сделаны на основе тех или иных эвристических соображений, например, предлагалось использовать метод касательной к точке перегиба, в котором за температуру фазового перехода принималась точка пересечения данной касательной с осью температур. Использование всех таких графических построений, основанных на эвристических соображениях, очевидно, приводит к заметным ошибкам, в том числе и систематическим.

Метод фазовых портретов, применяемый для обработки кривых зависимости мутности раствора от температуры позволяет эти ошибки устранить, во-первых, а, во-вторых, достаточно точно определить параметр, который и характеризует количественно фазовый переход.

Как будет ясно из дальнейшего, за критическую температуру фазового перехода целесообразно принять ту температуру, которая отвечает ситуации, когда половина макромолекул (от максимально возможного их числа) потеряла растворимость. Использование радиотехники для решения этой задачи оправдана по следующим причинам.

Для того, чтобы построить фазовый портрет, необходимо выполнить операцию численного дифференцирования. Как известно, эта операция сама по себе связана с большими ошибками, особенно в условиях, когда сами измерения обладают заметной погрешностью. В радиотехнике существует вполне определенный приём накопления данных, который позволяют выделить сигнал на фоне даже весьма заметных шумов.

Следовательно, целесообразно развить метод, который позволял бы получать зависимость производной мутности по температуре от температуры без использования операции численного дифференцирования. Конкретно, описываемый ниже метод, использует операцию физического дифференцирования, когда производная определяется непосредственно в процессе измерений за счет особенностей экспериментальной методики. Подчеркиваем, что физическое дифференцирование достаточно давно используется в экспериментальной лабораторной технике. В частности, хорошо известен метод радиочастотного дифференцирования, используемый в физике

плазмы при проведении зондовых измерений [100]. В данном случае речь идет о том, что исследуемый сигнал искусственно изменяется во времени на определенной частоте, а выделение второй гармоники позволяет получить информацию о второй производной, что непосредственно вытекает из разложения в ряд Тейлора.

Покажем вначале, что существует возможность развить методику определения температуры фазового перехода на основании экспериментальных зависимостей мутности раствора от температуры с высокой точностью. Параллельно данная методика позволяет получить количественный показатель, отражающий «степень термочувствительности», т.е. то, насколько резким является фазовый переход.

Эксперименты, доказывающие работоспособность предлагаемого измерительного оборудования, проводились с использованием сополимера N-винил-2-пирролидона (NVP) и винилпропил эфира (VPE).

Термоиндуцированные фазовые переходы данных сополимеров изучались методом динамического светорассеяния при 10-60<sup>0</sup>С с использованием Malvern Zetasizer Nano-S (Malvern Instruments, UK). В экспериментах регистрировалась зависимость интенсивности света, рассеянного раствором полимера, от температуры. Это позволяет получать необходимую информацию о характере фазового перехода, так как последний сопровождается помутнением раствора и, следовательно, его способностью эффективно рассеивать свет.

На рис. 8.1 представлены зависимости интенсивности света, рассеянного растворами сополимеров NVP-VPE при различных концентрациях (точки). На том же рисунке (сплошные линии) показаны кривые, полученные на основе рассматриваемой ниже методики, основанной на использовании фазовых портретов.

Видно, что рассматриваемый сополимер действительно испытывает фазовый переход, который, однако, является достаточно плавным: ширина переходной области составляет около 25<sup>0</sup>С.

На рис. 8.2 показаны аналогичные зависимости для случая водно-спиртовой смеси. Видно, что присутствие этанола в растворе смещает гидрофобно-гидрофильный баланс и при больших его концентрациях фазовый переход перестает иметь место.

На рисунках 8.3 и 8.4 представлены фазовые портреты кривых, показанных на рис. 8.1 и 8.2, соответственно.

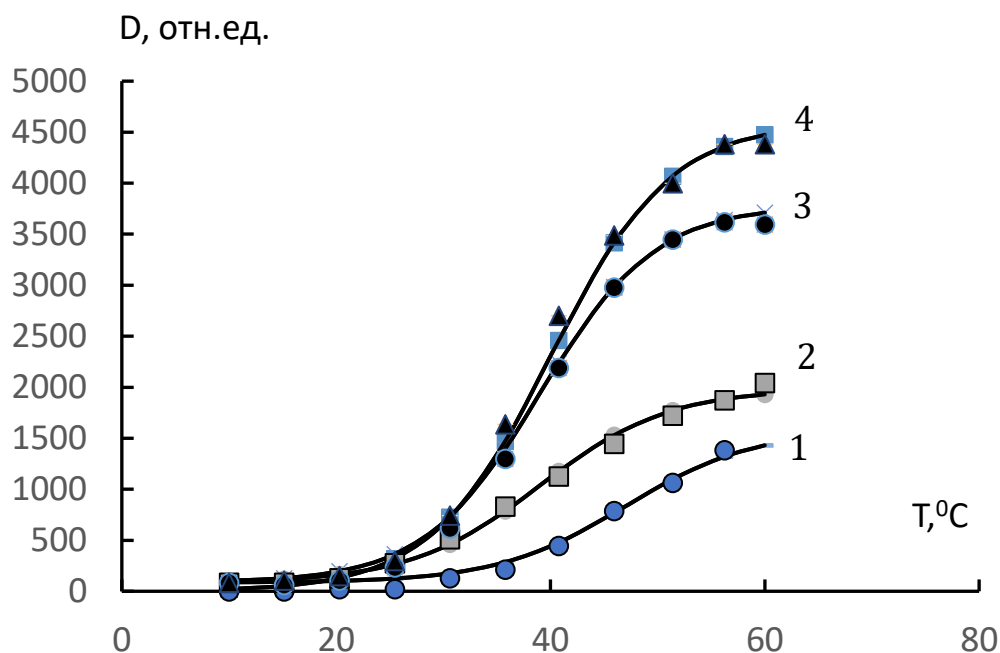


Рисунок 8.1 – Влияние температуры на интенсивность светорассеяния водных растворов сополимеров NVP-VPE при различных концентрациях; точки – экспериментальные данные, сплошные кривые – расчёт на основе фазовых портретов;  $C_{\text{спл}} = 2$  (1), 6 (2), 8 (3); 10 мг/мл (4); Состав сополимера  $[\text{NVP}]:[\text{VPE}] = 74,5:25,5$  моль.%;

Представленные экспериментальные фазовые портреты получены методом численного дифференцирования с использованием приближенной формулы (точки на рис. 8.3 и 8.4)

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_n = \frac{1}{10\Delta x} (2y_{n+2} + y_{n+1} - y_{n-1} - 2y_{n-2}) \quad (8.1)$$

Видно, что фазовый портреты кривых, представленных на рисунках 8.1 и 8.2, с высокой точностью описывается параболическими зависимостями (пунктирные линии на рис. 8.3 и 8.4).



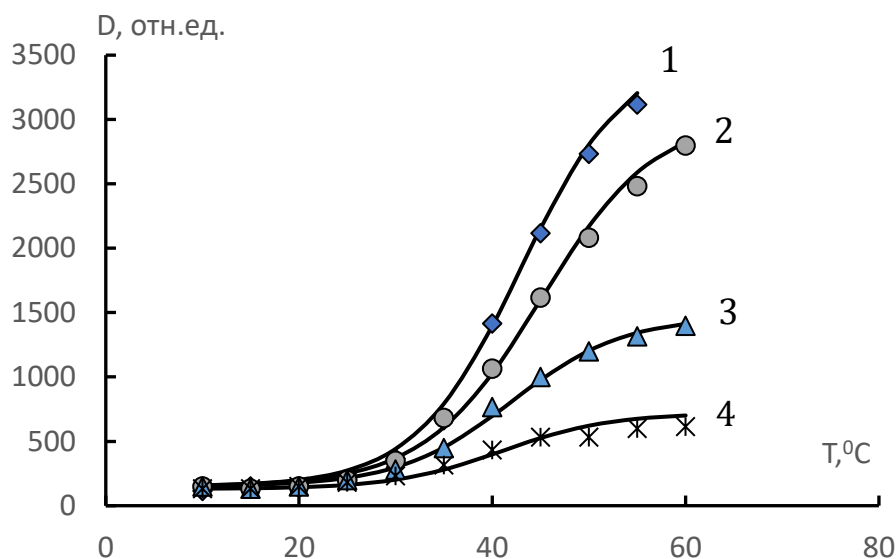


Рисунок 8.2 – Влияние этанола на температуру фазового разделения водных растворов сополимеров NVP-VPE;  $C_{\text{Этанола}} = 5$  (1); 10 (2); 15 (3); 30 масс. % (4); Состав сополимера [NVP]:[VPE] = 77,5:22,5 моль.%;  $C_{\text{СПЛ}} = 10$  мг/мл; точки – экспериментальные данные, сплошные кривые – теоретический расчёт на основе фазовых портретов

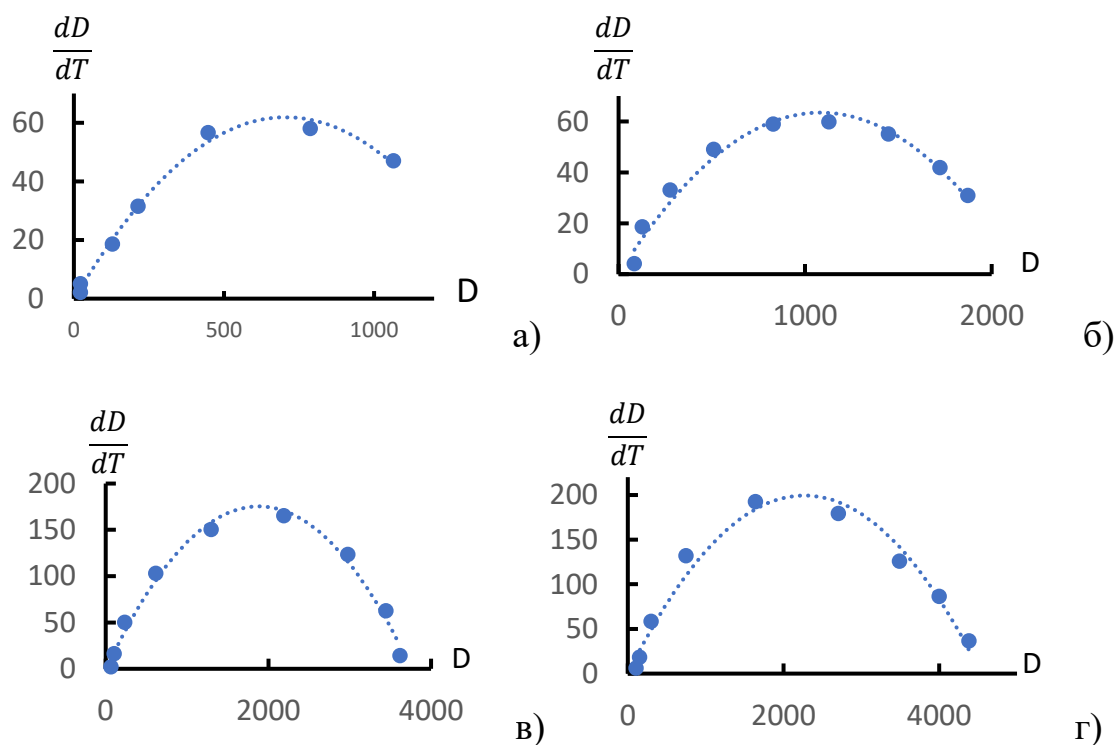


Рисунок 8.3 – Фазовые портреты кривых, представленных на рис. 8.1; диаграммы а) – г) отвечают кривым 1 – 4, рис 1.

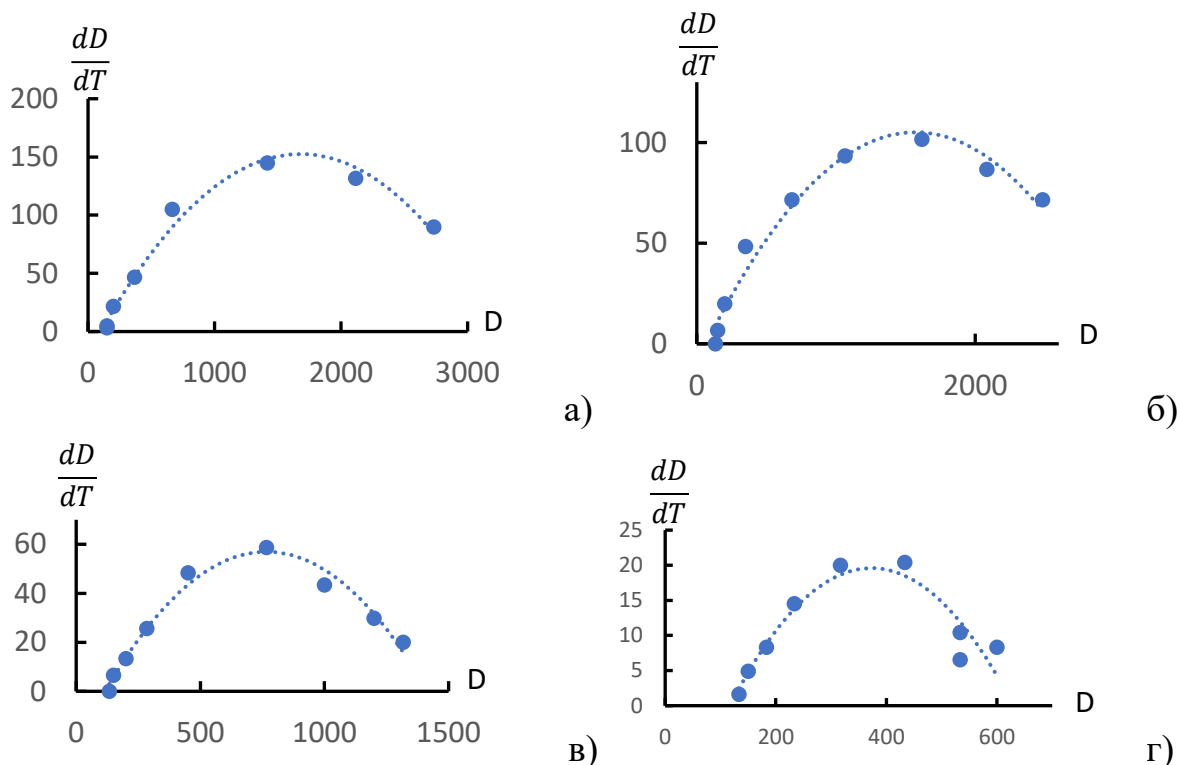


Рисунок 8.4 – Фазовые портреты кривых, представленных на рис. 8.2; диаграммы а) – г) отвечают кривым 1 – 4, рис 8.2.

Это говорит о том, что зависимость степени прозрачности (мутности) раствора при фазовом переходе подчиняется следующему дифференциальному уравнению первого порядка

$$\frac{dD}{dT} = \frac{D^2}{D_0 T_0} - \frac{D}{T_0} \quad (8.2)$$

где  $\frac{1}{D_0 T_0}$  и  $\frac{1}{T_0}$  – коэффициенты, получаемые методом наименьших квадратов при параболической аппроксимации экспериментально полученного фазового портрета.

Решение уравнения (8.2) имеет вид:

$$D = \frac{D_0}{1 + \exp((T_{ph} - T)/T_0)} \quad (8.3)$$

где – параметр, интерпретируемый как температура фазового перехода.

Формула (8.3) позволяет также установить физический смысл параметров, входящих в формулу (8.2),  $T_0$  – параметр, определяющий крутизну фазового перехода,  $D_0$  – экстраполяционный экстремум оптической плотности.

По формуле (8.3) рассчитывались зависимости, показанные на рисунках 8.1 и 8.2 сплошными линиями. Видно, что имеет место хорошее соответствие полученных при помощи метода фазовых портретов и исходных

экспериментальных данных. Параметры зависимостей, представленных на рис. 8.1 и 8.2 сплошными линиями, представлены в Таблицах 8.1 и 8.2, соответственно. Таблицы показывают, что предложенный метод позволяет определять весьма малые вариации температуры фазового перехода, обусловленные изменениями концентрации полимера в растворе или изменениями термодинамического качества среды.

Таблица 8.1. Параметры теоретических зависимостей для кривых рис. 8.1, полученные на основании метода фазовых портретов

Номер кривой	$D_0$	$T_{ph}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$
1	1500	47	6
2	1900	39	6
3	3700	39	5,4
4	4600	40	5,6

Таблица 8.2. Параметры теоретических зависимостей для кривых рис. 8.2, полученные на основании метода фазовых портретов

Номер кривой	$D_0$	$T_{ph}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$
1	3400	43	5,5
2	2900	45	6
3	1320	42	5,8
4	590	41	5,6

С точки зрения определения температуры фазового перехода, полученное решение представляет интерес поскольку оно фактически отвечает логистической кривой. Действительно, если в формулу (8.3) подставить  $T = T_{ph}$ , то тогда значение величины, стоящей под знаком экспоненты будет равно нулю. Соответственно в этом случае имеет место  $D = \frac{D_0}{2}$ . Иначе говоря,  $T_{ph}$  - это та температура, при которой фазовый переход испытывает ровно половина молекул, содержащихся в растворе. Именно эту величину и целесообразно принять за температуру фазового перехода, особенно в тех случаях, когда он осуществляется достаточно плавно.

Таким образом метод фазовых портретов позволяет получить достаточно простые и надежные аппроксимации зависимостей мутности раствора от температуры, и он же позволяет достаточно точно определить характерную величину, которая и может служить эффективной мерой температуры фазового перехода. При этом, зависимости оптической плотности раствора, испытывающего термоиндуцированный фазовый переход от температуры, описываются логистическими кривыми, отвечающими параболическому фазовому портрету, что и показывают представленные выше экспериментальные данные.

Этот факт позволяет разработать радиотехнический метод точной оценки параметра, характеризующего температуру фазового перехода, за которую, в соответствии со сказанным выше целесообразно принять такую температуру, при которой равно половина макромолекул, содержащихся в растворе испытывает изменения конформации и теряют растворимость.

Данная методика предполагает использование нескольких идентичных кювет, содержащих идентичный раствор. Раствор в этих кюветах находится при различных температурах, с определенным шагом  $\Delta T$ .

При условии, что мутность или прозрачность раствора является одинаковой, а интенсивность источников света выровнена, то тогда амплитуда сигнала, регистрируемого на каждом из трёх или большем количестве тактов будет постоянной. Если же под воздействием температуры в системе происходит фазовый переход, то тогда интенсивности прошедшего света начнут различаться. В простейшем случае, когда используются только две измерительные кюветы, существует возможность отыскать производную, выделяя переменную составляющую. При этом, измерения интенсивности фактически становятся многократными, а выделения именно переменной составляющей позволяет обеспечить высокую точность проведения измерений, точнее высокую точность получения разности сигналов.

Подчеркиваем, что этот метод позволяет также ориентироваться на автоматическое измерение разности температур для чего в предлагаемой методике используется термopapa. Тем самым автоматически регистрируется и разность амплитуд, и разность температур, что и обеспечивает высокую точность проведения измерений. Ещё более высокую точность измерений при получении производной обеспечивает метод, когда используется три ячейки.

Функциональная схема регистратора фазовых портретов (измерителя температуры фазового перехода, рис. 8.5) включает в себя в простейшем случае две измерительные кюветы 1 и 2. Кюветы идентичны, и регистрация мутности осуществляются также при помощи двух идентичных источников света 3 и 4, в качестве которых, например, могут использоваться лазерные светодиоды. Учитывая, что серийно выпускаемые источники света обладают определённым разбросом характеристик, используется схема автоматической настройки выравнивания интенсивностей, что необходимо для устойчивой регистрации разности оптической плотности среды.

Выравнивание интенсивности осуществляется в холостом режиме, когда кюветы являются оптически прозрачными, а их температура остается стабильной и устанавливается ниже заведомо ниже температуры фазового перехода.

Один из источников света 3 подключён к высокостабильному источнику питания 5. Сигнал на второй источник света 4 подаётся через схему, обеспечивающую подстройку значения напряжения питания элемент 6. Данный элемент фактически представляет собой усилитель постоянного тока, коэффициент усиления которого регулируется в автоматическом режиме и может, в том числе, принимать значение меньше единицы.

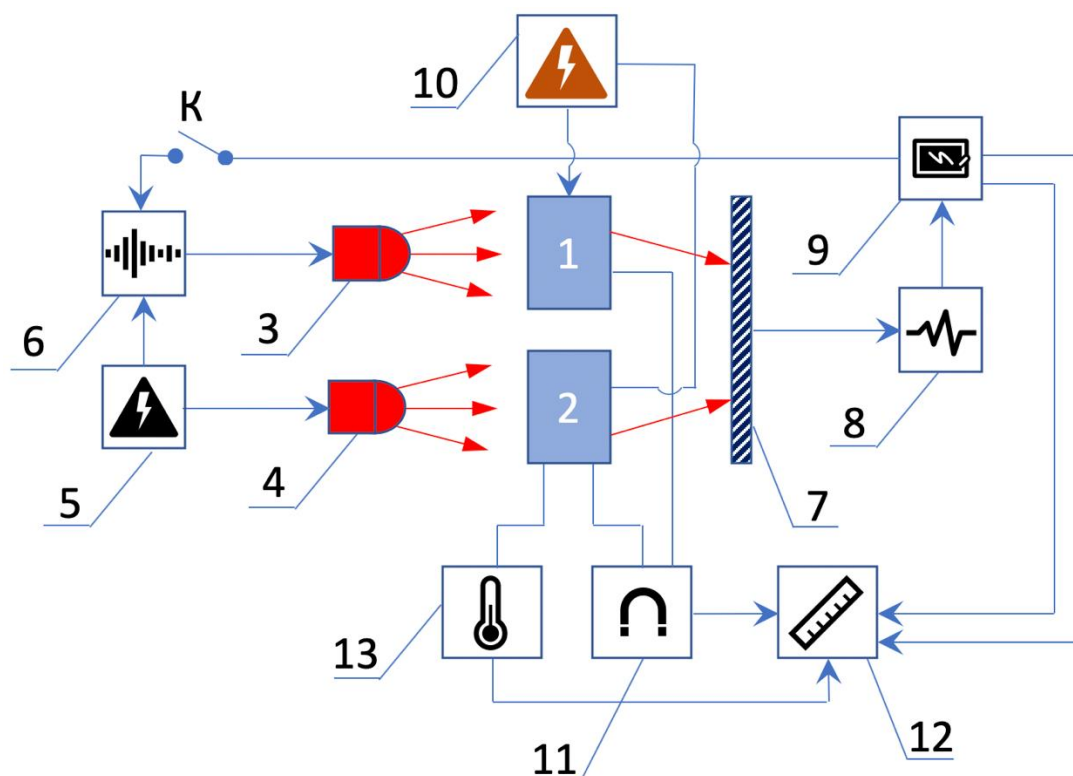


Рисунок 8.5 – Функциональная схема радиотехнического регистратора температуры фазового перехода.

Данные светодиоды включаются поочередно с тем, чтобы при условии, если интенсивность является строго одинаковой, то тогда суммарно они создают постоянный сигнал. Геометрия расположения кювет 1 и 2 подбирается так, что излучение, прошедшее через кюветы, попадает на один и тот же участок фоторегистрирующей поверхности элемента 7. Соответственно, напряжение, которое генерируется данным элементом, зависит от суммы интенсивностей излучения, прошедшего через обе кюветы.

С выхода фоторегистрирующего элемента 7 сигнал подаётся на усилитель 8, а с него на формирователь измеряемого сигнала 9. В его состав входят фильтр высоких частот, который разделяет постоянную и переменную составляющие, а также блок преобразования переменного напряжения в постоянное.

Постоянное напряжение, сформированное из переменной составляющей, фактически является измеряемым сигналом, т.к. оно пропорционально разности интенсивности оптических сигналов, прошедших через кюветы. Это же напряжение используется для управления блоком 6, обеспечивающим подстройку частоты в режиме настройки. В режиме, когда проводятся измерения, ключ К отключается.

Температура в кюветах 1 и 2 регулируется при помощи источника напряжения 10, нагруженного на нити накаливания. Характер напряжений подбирается так, что сигнал подаваемый на кюветы 1 и 2 разнесен во времени.

Иначе говоря, нагрев одной из кювет опережает по времени нагрев другой, что создает необходимую разность температур.

Дополнительно в кюветы 1 и 2 устанавливается термопара, которая обеспечивает регистрацию разности температур посредством элемента 11. Дополнительно устанавливается измерительный элемент 13, который обеспечивает регистрацию температуры в автоматическом режиме. Измеренные сигналы разности температур, температуры и разности интенсивности подаётся на блок 12, обеспечивающий передачу измеряемых сигналов или на персональный компьютер, или на Bluetooth модуль том случае если данная схема подключается к компьютеру через смартфон. Дополнительно от блока 12 на блок 9 подается также сигнал пропорциональный суммарной интенсивности сигнала, прошедшего через кювету. Таким образом, данная схема одновременно позволяет регистрировать и зависимости интенсивности от температуры, то есть осуществлять измерение классического типа, а также обеспечивать регистрацию разностных сигналов, которые необходимы для построения фазового портрета.

Пример радиотехнической схемы, нацеленной на определение температуры фазовых переходов, представляет крайне существенный интерес с точки зрения цифровой обработки сигналов.

Действительно, этот метод строго говоря позволяет получить непосредственно фазовый портрет. Если посмотреть на кривые, показанные на рис. 8.3 и 8.4 с точки зрения типового подхода к цифровой обработке сигналов, то выяснится, что эта кривая несёт очень большой объем информации, если его подсчитать через типовой подход к оцифровке. Действительно, каждому отдельному интервалу изменения величины  $D$  нужно поставить в соответствие определенный диапазон изменений её производной. Этот диапазон следует разбить на подинтервалы, количество которых диктуется точностью измерений. Далее следует вычислить количество информации для каждого из интервалов по шкале  $D$  по формуле Шеннона.

Очевидно, что здесь объём информации будет весьма большим, особенно, если требуется достичь приемлемой точности измерений. В то же время очевидно, что если мы говорим об измерении вполне конкретного набора величин, характеризующих параболу, проходящую через начало координат, то фактически здесь нужно измерить только два параметра и собственно для этого и предназначена схема рис.8.5.

Соответственно встает вопрос о том, можно ли построить схему, которая будет более простым способом измерять именно эти два параметра. Применительно к рассматриваемой ситуации вопрос имеет вполне очевидный ответ - температура фазового перехода, в соответствии со сказанным выше, есть та температура, при которой вторая производная оптической плотности среды по температуре проходит через ноль.

Следовательно, для радиотехнического измерения указанных параметров, строго говоря, вовсе необязательно измерять аналоговые величины и более этого вовсе необязательно пытаться их оцифровывать. Достаточно построить схему, которая будет получать вторую производную и определять её знак. Ситуаций

здесь может быть очевидно только три: вторая производная имеет положительный знак, отрицательный знак и равна нулю. Тем самым мы возвращаемся к троичной логике, т.е. строго говоря та схема, которая решает ту же самую задачу теоретически может быть построена сугубо в терминах троичной логики.

Но, это далеко не единственный пример, который заставляет обратить пристальное внимание на использование методов обработки медленно изменяющихся сигналов.

## **9. Переходные процессы: вопрос о количестве информации, содержащейся в гладкой кривой**

Физическая химия гидрофильных полимеров изучает большое количество процессов, которые могут быть классифицированы как переходные. Например, зависимость измеряемых характеристик раствора термочувствительного полимера от температуры представляет собой монотонную кривую, начальный и конечный участки которой выходят на некоторое «плато» [101,102]. Сходный тип зависимостей характерен и для многих других воздействий на стимул-чувствительные полимеры (механических [103,104], электрических [105,106], вариаций pH [107,108] и т.д.). При изменении одного или нескольких управляющих параметров система переходит из одного состояния в другое, причем этот переход осуществляется монотонным образом.

Изменение параметров, характеризующих растворы полимеров и полимерные гидрогели, во времени также, как правило происходит монотонным образом [109-112]. Это представляется вполне естественным, поскольку для физико-химических систем такого рода характерна высокая степень инерционности.

До самого последнего времени господствовал классический подход к построению теоретических моделей, призванных описать процессы, протекающие в системах рассматриваемого типа. Из тех или иных соображений выводились уравнения, описывающие рассматриваемый процесс, а затем проводилось сопоставление с экспериментом. При этом число параметров, заложенных в теоретическую модель, часто является весьма большим [113,114].

Общие соображения, вытекающие из современной теории информации, о которых говорилось в предшествующих главах, позволяют утверждать, что классический подход к построению теории переходных процессов оптимален далеко не всегда. Как было показано выше, количество информации, содержащейся в медленно изменяющихся сигналах, намного меньше того количества информации, которое отвечает формальному использованию формулы Шеннона.

В данной главе показано, что к описанию переходных процессов, применим подход, близкий к тому, что выше был использован для обработки медленно изменяющихся сигналов.

А именно, в данной главе показано, что гладкая кривая, описывающая переходной процесс, содержит, как правило, весьма малый объем информации, который может быть измерен на основании аналогии с теоремой Котельникова.

Это представляет и практический интерес, так как выясняется, что такие кривые могут быть охарактеризованы ограниченным числом параметров. Следовательно, любая теоретическая модель, которая по построению содержит большее количество параметров, заведомо является избыточной.

В качестве примера использованы кривые, описывающие кинетику фазового перехода в растворе термочувствительного полимера — поливинилкапролактама (ПВКЛ).



Для получения данных кривых применялись растворы поливинилкапролактама (ПВКЛ), синтезированные по методике, ранее использованной, в частности, в [115]. Экспериментальная установка, предназначенная для измерения наблюдаемой скорости фазового перехода в растворах термочувствительных полимеров (рис.1), была собрана по методике [116].

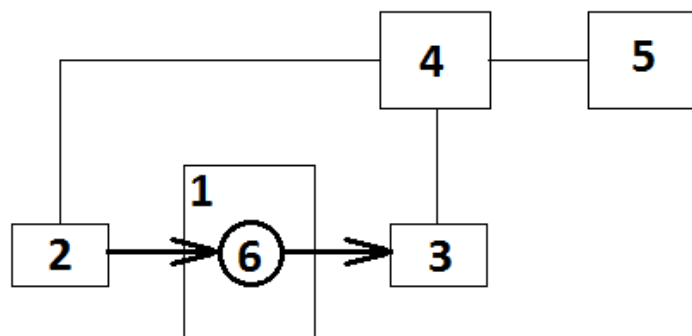


Рисунок 9.1 – Схема экспериментальной установки

- кювету (1), обладающую двумя плоскопараллельными оптическими окнами, выполненными из кварцевого стекла с оптической точностью; расстояние между окнами составляет 1,5 мм; высота кюветы 7 мм, ширина – 6 мм.
- источник оптического излучения (2), собранный на базе сверхъяркого белого светодиода,
- приемник оптического излучения (3), собранный на базе фоторезистора СФЗ-2Б.
- электронную схему (4), обеспечивающую регистрацию относительной оптической плотности раствора в реальном времени.
- персональный компьютер (5), обеспечивающий запись полученных табличных данных в текстовый файл.
- нагревательный элемент (6), представляющий собой петлю, выполненную из тонкой нихромовой нити; диаметр петли 5 мм, диаметр проволоки – 1,5 мм.

Регистрирующая схема построена на базе микроконтроллера ATMEGA8-16PU, оснащена разъемом подключения светодиода (или диодного лазера) и двумя разъемами подключения фоторезисторов типа СФЗ-2Б через встроенные АЦП. Устройство подключается к персональному компьютеру через интерфейс USB и управляется специализированной программой, которая позволяет записывать выборку данных, полученных с регистрирующей схемы.

Установка дает возможность определить зависимость относительной интенсивности излучения от времени с шагом в диапазоне от 0,001 до 1с, задаваемым программно. Конечным результатом, записываемым на персональный компьютер, является табулированная зависимость отношения  $I_1/I_{10}$  от времени.

На рис.9.2 и рис.9.3 представлены примеры зависимостей относительной оптической плотности исследуемого раствора от времени. Зависимости получены при начальной температуре 28<sup>0</sup>С и конечной температуре 48<sup>0</sup>С.

Кривые относятся к одной и той же серии измерений и отличаются только сдвигом по времени.

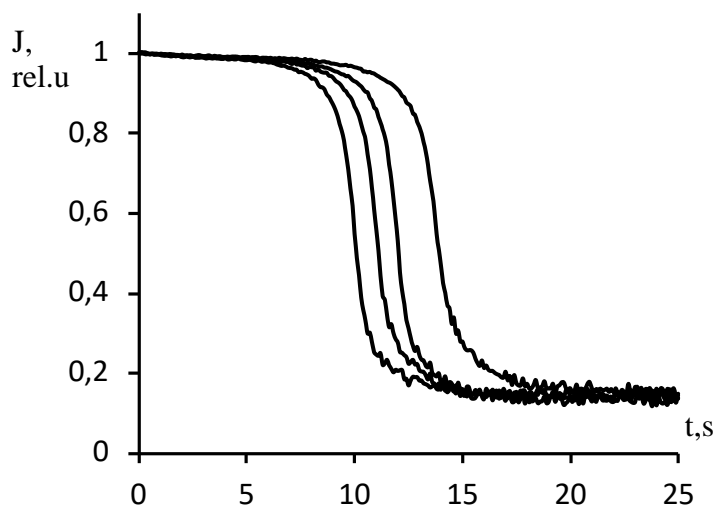


Рисунок 9.2 – Зависимости оптической плотности раствора; концентрация ПВКЛ – 2%, концентрация хлорида натрия – 0,15% (указаны массовые проценты).

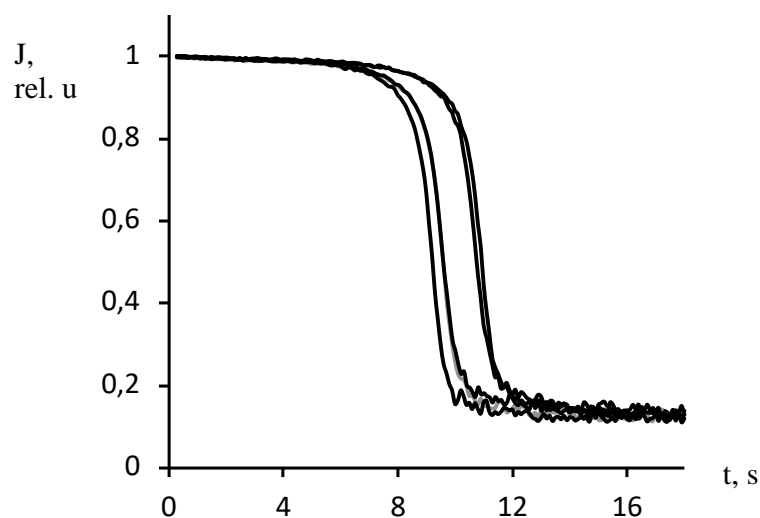


Рисунок 9.3 – Зависимости оптической плотности раствора; концентрация ПВКЛ – 2%, концентрация хлорида натрия – 0,30% (указаны массовые проценты).

Видно, что кривые имеют типичный для переходных процессов вид: имеет место переход от одного «плато» к другому. Видно также, что для разных концентраций соли вид кривых сохраняется, меняется только скорость фазового перехода. Это позволяет использовать их в качестве наглядного примера для

отработки метода измерения количества информации, содержащихся в кривых, описывающих переходные процессы.

Обобщение данного метода, предлагаемое в данной работе, основывается на теореме Котельникова, которая, де-факто лежит в основе всей современной телекоммуникационной индустрии. Данная теорема утверждает, что если спектр некоторого сигнала ограничен, то для его восстановления достаточно знать его значения только в отдельных точках – нет необходимости регистрировать кривую полностью.

На основании общих соображений можно полагать, что спектр любого медленно изменяющегося сигнала также будет заведомо ограниченным. Физически это соответствует тому, что высокие частоты, присутствующие в спектре, отвечают изменениям состояния системы с достаточно высокой скоростью. Если же скорость изменения процесса физически ограничена, например, инерционностью системы (что характерно для систем на основе гидрофильных полимеров), то таких частот в спектре появиться не может.

Применительно к системам рассматриваемого типа аналогия с теоремой Котельникова приводит к парадоксальному на первый взгляд выводу: для того, чтобы получить полную информацию об исследуемом процессе нет необходимости регистрировать ту или иную зависимость полностью. Достаточно провести измерения при некоторых фиксированных значениях управляющих параметров. Впрочем, именно этот прием часто действительно используется на практике – зависимость восстанавливается (проводится гладкая кривая) по дискретным точкам на графике, отражающем экспериментальные данные.

Предлагаемый подход, в том числе, позволяет обосновать использование данного приема с точки зрения теории информации.

На рис. 9.4а,б представлены фазовые портреты master curve для рис. 9.2 и рис. 9.3, соответственно; master curve получена сдвигом кривых, представленных на данных рисунках по оси времени с последующим усреднением.

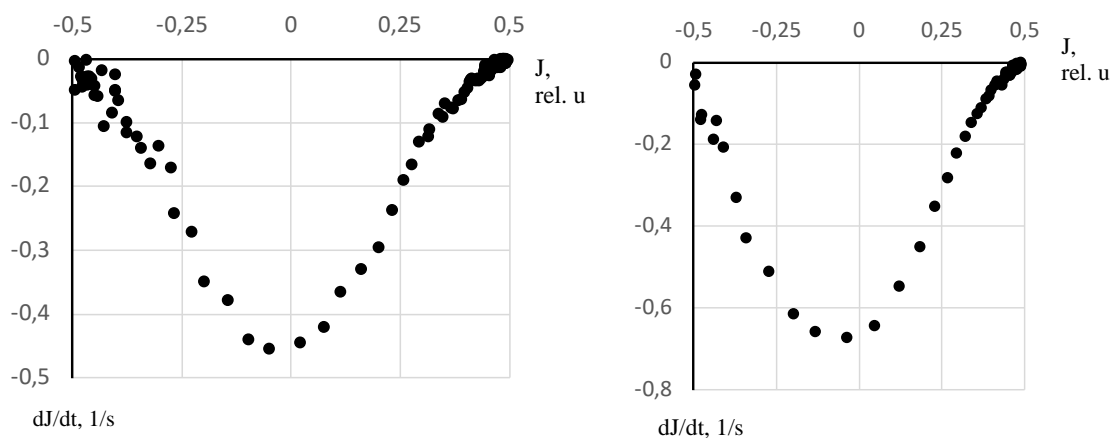


Рисунок 9.4 – Фазовые портреты master curve для рис. 9.2 и рис. 9.3, соответственно

Данные кривые получены следующим образом. Исходная зависимость  $J_0(t)$ , нормированная на значение интенсивности в начальный момент времени, преобразована как

$$J(t) = \frac{J_0(t) - J_0(t \rightarrow \infty)}{1 - J_0(t \rightarrow \infty)} - 0,5 \quad (9.1)$$

Далее численно вычислена производная  $J(t)$  по времени. Графики, представленные на рис. 9.4 представляют собой зависимость  $\frac{dJ}{dt}$  от  $J$ .

Действовать дальше можно различными способами. Например, графики рис. 9.4. можно продолжить по антипериодичности, благодаря чему по форме они станут близки к гармоническому сигналу. Далее полученную функцию допустимо разложить в ряд Фурье, причем и без наглядной демонстрации видно, что этот ряд будет характеризоваться быстрым убыванием компонент.

Этот факт сам по себе создает условия для применения теоремы Котельникова. Фактически, это означает, что «сигнал», отвечающий кривым, показанным на рис. 9.4, имеет ограниченный спектр.

Но, раз это так, то фазовый портрет кривой, может быть восстановлен по ограниченному набору отсчетов. В том числе, это и означает, что кривая, описывающая переходной процесс, в действительности может быть восстановлена только по ограниченному набору экспериментальных «точек». Или, что то же самое, она описывается ограниченным набором параметров.

К тому же выводу приводит и построение, представленное на рис. 9.5.

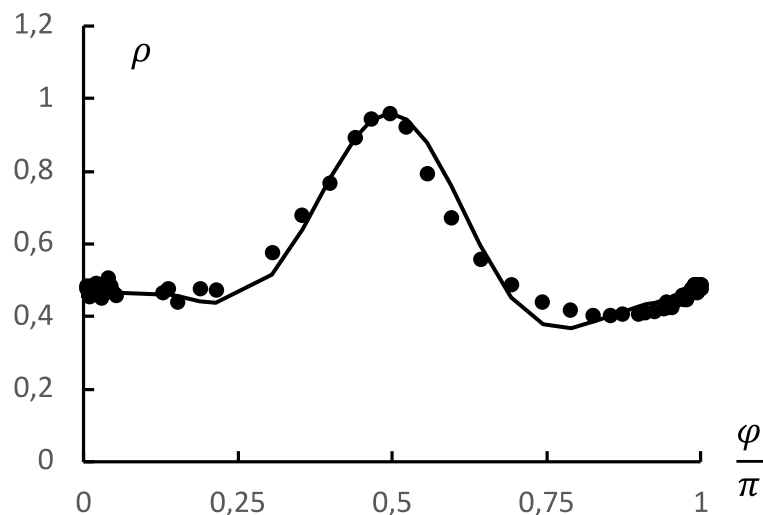


Рисунок 9.5 – Фазовый портрет рис.4б в полярных координатах и его аппроксимация отрезком ряда Фурье (сплошная линия);  $\rho = 0,56 + 0,21 \cos 2\pi(\varphi - 0,5) - 0,035 \sin 2\pi(\varphi - 0,5) + 0,15 \cos 4\pi(\varphi - 0,5) + 0,04 \cos 4\pi(\varphi - 0,5)$

На данной кривой фазовый портрет представлен в полярных координатах, к которым можно перейти в плоскости переменных, используемых для его

построения. Можно видеть, что и в этом случае спектр «сигнала» заведомо является ограниченным.

Это создает вполне определенные перспективы для компрессии информации, отражающей характер переходных процессов, что полностью отвечает той совокупности идей, которые были изложены в первых главах данной книги.

Может создаться впечатление, что переходные процессы являются только частным случаем, т.к. круг реальных природных явлений гораздо шире. Однако, аналогичные построения можно провести и для гораздо более сложных случаев, что и демонстрирует материал следующей главы.

## 10. Квазиколебательные процессы: рынок криптовалют и возможности перехода к анализу медленно изменяющихся процессов

В предыдущих главах рассматривалась нейросетевая модель ноосферы, из которой вытекает, что ноосферу допустимо рассматривать как отдаленный аналог головного мозга человека.

Следующим шагом, очевидно, является отыскание экспериментальных доказательств правомочности нейросетевой модели ноосферы.

Материал данной главы позволяет утверждать, что ноосфере присущи вполне определенные «ритмы», отчасти сходные с теми, что присущи головному мозгу человека (альфа-ритм и т.д.).

Разумеется, данное утверждение нельзя не признать дискуссионным, однако с точки зрения целей данной книги это и не так существенно. Главное, материал данной главы демонстрирует, как именно метод фазовых портретов может быть применен и в гораздо более сложных случаях, нежели были рассмотрены в предыдущей главе.

В качестве исходного экспериментального материала взяты зависимости полного числа транзакций криптовалюты Ethereum от времени в планетарном масштабе. Такие данные находятся в открытом доступе [117,118]. Данные охватывают период времени с 30.07.15 по 30.07.22, время исчисляется в днях. Использование данных указанного типа для изучения процессов, протекающих в ноосфере в целом, является допустимым, так как в соответствии с доводами, отраженными в предшествующих главах, ноосфера на данном историческом этапе конвертирована во вполне определенную человеко-машинную систему.

Кроме того, алгоритм обработки временных рядов данных, также основанный на нестандартном применении теоремы Котельникова, актуален и сам по себе вследствие значительного роста рынка криптовалют и его влияния на мировую экономику, а также выраженного интереса к технологии блокчейн [119].

Предлагаемый метод состоит в следующем.

На рис.10.1 представлены исходные данные – зависимость полного числа транзакций криптовалюты Ethereum от времени (кривая 1).



Рисунок 10.1 – Зависимости числа транзакций и курса ETH к USD от времени.

На исходной кривой выделяются участки, отвечающие переходным процессам и макроскопическим шокам.

Описание переходных процессов, в соответствии с материалами предыдущей главы дается кривыми вида

$$u(t) = \frac{A_i}{1 + \exp\left(-\frac{t - t_{0i}}{T_i}\right)} \quad (10.1)$$

Параметры, характеризующие каждый из переходных процессов  $A_i$ ,  $t_{0i}$ ,  $T_i$ , на первом этапе выбираются из эвристических соображений. На завершающем этапе осуществляется их коррекция (методика коррекции рассматривается ниже).

Описание макроскопических шоков дается кривыми, представляющими собой производную кривых вида (10.1).

$$\frac{du}{dt} = \frac{A_k}{T_k} \frac{\exp\left(-\frac{t - t_{0k}}{T_k}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{t - t_{0k}}{T_k}\right)\right)^2} \quad (10.2)$$

На первом этапе реализации алгоритма, параметры, входящие в формулу (10.2), подбираются, исходя из эвристических соображений.

Из исходного временного ряда вычитаются зависимости, отвечающие переходным процессам, а также макроскопическим шокам.

Первичный пример расчетов, демонстрирующих отделение переходных процессов от исходного, представлен на рис. 10.2.

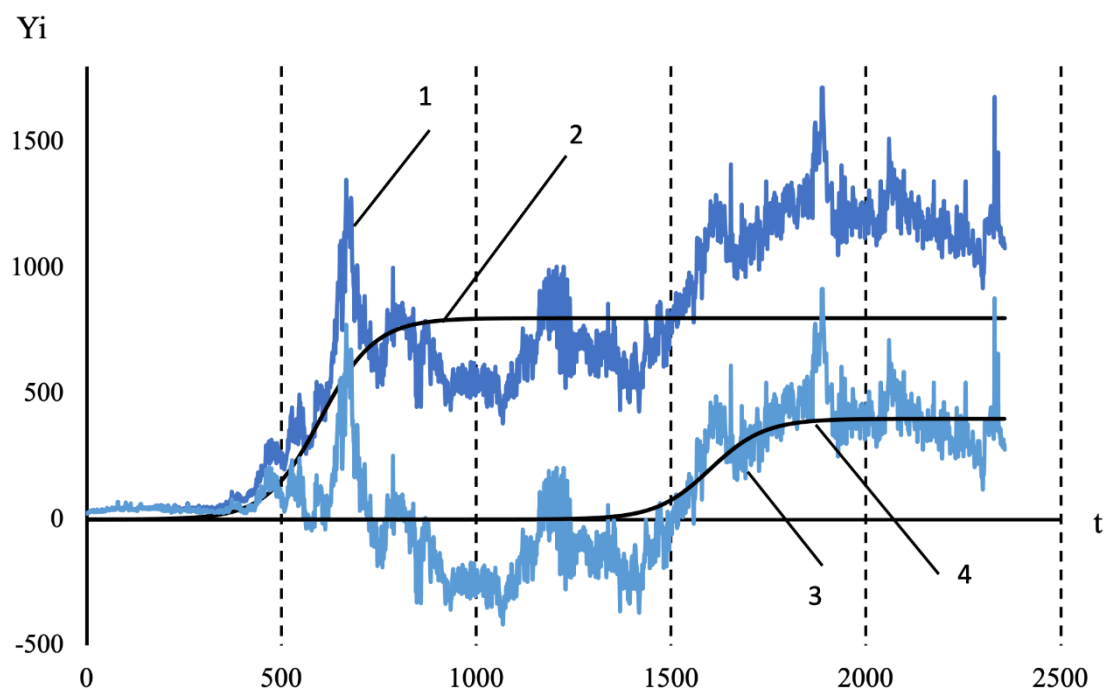


Рисунок 10.2 – Отделение составляющих, отвечающих переходным процессам; 1 – исходная кривая, 2 и 4 – кривые первого и второго переходного процесса, соответственно, 3 – кривая после отделения первого переходного процесса.

На первом шаге из исходного ряда (кривая 1) вычитается зависимость вида (10.1). Эта зависимость – кривая 2, параметры которой указаны в Табл.10.1. Результат вычитания – кривая 3, из которой далее вычитается зависимость, отвечающая второму переходному процессу (кривая 4). Параметры, характеризующие данную зависимость, также представлены в Табл.10.1.

Таблица 10.1. Параметры кривых переходы процессов, рис. 10.2.

Параметры	$A_i$	$t_{0i}$ , дни	$T_i$ , дни
Кривая 2	800	600	70
Кривая 4	400	1600	70

Результат отделения переходных процессов (разность между кривыми 3 и 4, рис. 10.2) представлена на рис.10.3а.

К этой кривой, в свою очередь, применена процедура фильтрации, основанная на свертке исходной функции с нормированной функцией

$$G(t) = \frac{T_0}{t} \sin(t/T_0), \quad (10.3)$$

представляющей собой Фурье-образ прямоугольной функции (рис.10.3б).

Данная процедура полностью аналогична частотной фильтрации. Кривую, представленную на рис. 10.3б можно рассматривать по аналогии с сигналом, прошедшим через фильтр низких частот. Ее отделение от исходной кривой дает, как и следовало ожидать, временной ряд, в котором присутствует только высокочастотная составляющая (Рис.10.4а), причем близкая к «зашумленной» периодической.

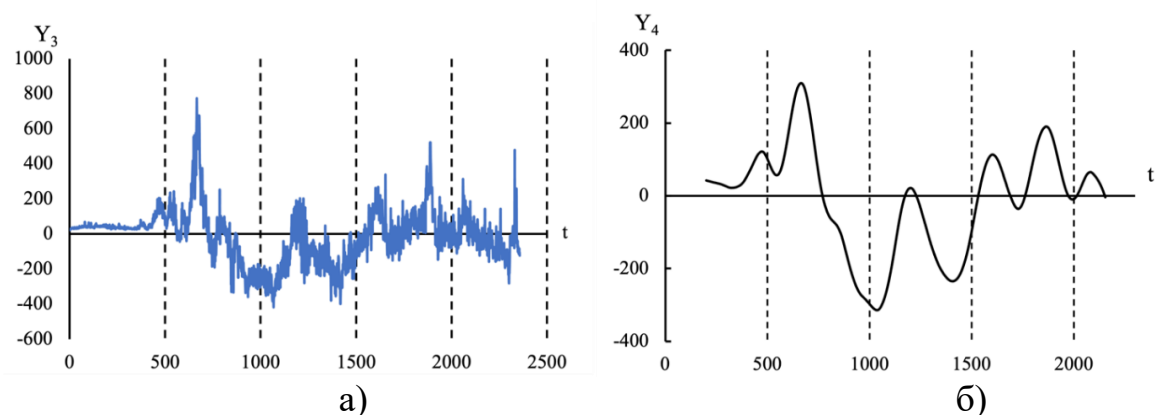


Рисунок 10.3 – Результат отделения переходных процессов (а) и результат частотной фильтрации полученной кривой (б) при  $T_0 = 30$  (в днях).



Существенно, что полученную кривую можно редуцировать к медленно изменяющемуся процессу. А именно, эту кривую можно рассматривать по аналогии с сигналом на определенной частоте, но модулированным по амплитуде и фазе (плюс медленно изменяющаяся еще более низкочастотная составляющая).

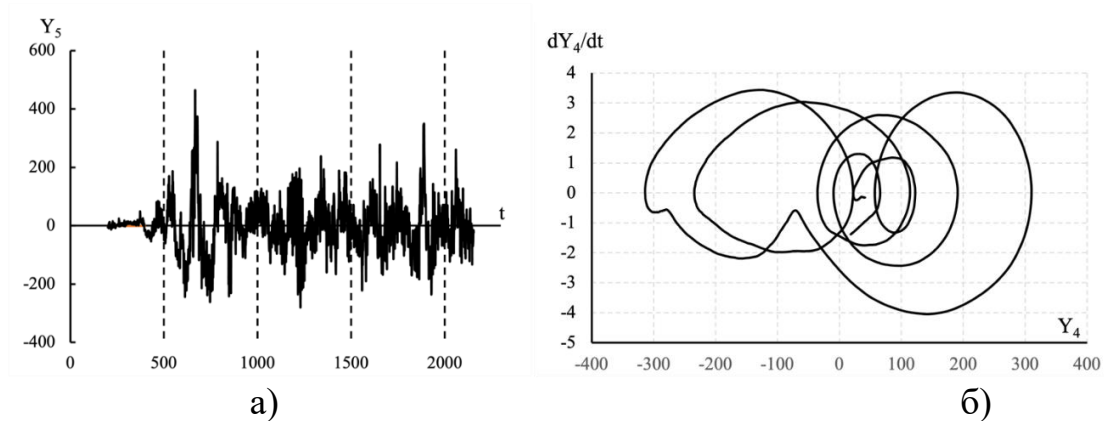


Рисунок 10.4 – Результат выделения высокочастотной составляющей (а) и фазовый портрет (б) кривой рис.10.3б.

Это осуществляется при помощи метода фазовых портретов, рассмотренного в предыдущей главе

Методика состоит в следующем. Под фазовым портретом, в соответствии со сказанным выше, понимается зависимость производной  $\frac{df}{dt}$  некоторой функции по времени от самих значений этой функции  $f$ . В том случае, когда колебание является строго гармоническим, такой фазовый портрет представляет собой эллипс.

Действительно, положим

$$f(t) = \sin\left(\frac{t}{T_0} + \varphi\right), \quad (10.4)$$

Тогда

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{T_0} \cos\left(\frac{t}{T_0} + \varphi\right)$$

Откуда вытекает, что фазовый портрет гармонического колебания действительно представляет собой эллипс, причем отношение его полуосей дает значение  $T_0$ .

$$\left(T_0 \frac{df}{dt}\right)^2 + f^2(t) = 1, \quad (10.5)$$

Можно видеть, что кривую на рис. 10.4б допустимо рассматривать как состоящую из фрагментов эллипсов, причем таких фрагментов сравнительно

немного. Это позволяет рассматривать выделенную кривую как колебание на некоторой основной частоте, модулированное по частоте и амплитуде, причем вариации частоты остаются сравнительно небольшими.

Отметим, что выделение такого колебания во многом связано с выбором частоты обрезания. В случае, представленном на рис. 10.4б такая частота отвечает периоду в 30 дней. При выборе другого значения основных частот может стать больше одной, что показывает рис. рис. 3.3.5а, на котором представлена та же зависимость, что и на рис. рис. 3.3.3б, но только при частоте обрезания, отвечающей периоду в 10 дней.

Фазовый портрет такого колебания также становится гораздо более сложным (рис. 10.5б), хотя и на нем допустимо выделить отдельные фрагменты эллипсов.

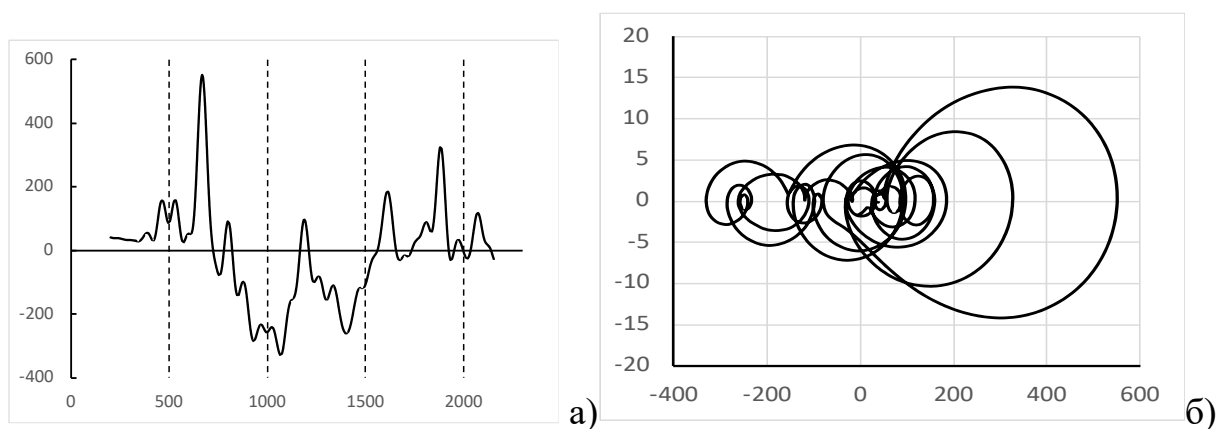


Рисунок 10.5 – Результат частотной фильтрации кривой Рис.10.3б при  $T_0 = 10$ , дни (а) и фазовый портрет данной кривой (б).

Предлагаемая методика основывается на том, что для каждого фрагмента эллипса осуществляется вычисление текущих параметров, которые его задают, по методу наименьших квадратов.

Специфика применения данного метода к рассматриваемому случаю состоит в следующем. Наряду с гармонической (локально) составляющей в сигнале присутствует и медленно измеряющаяся постоянная составляющая, т.е. локальное уравнение фазового портрета имеет вид

$$\left(\frac{df}{dt}\right)^2 + \left(\frac{f(t)+c}{T_0}\right)^2 = 1, \quad (10.6)$$

Введем обозначения

$$f(t_i) = x_i, \left.\frac{df}{dt}\right|_{t_i} = y_i \quad (10.7)$$

Тогда на основании формулы (10.6) можно записать следующий функционал

$$J = \sum (y_i^2 + a_1 x_i^2 + a_2 x_i - a_3)^2, \quad (10.8)$$

где

$$a_1 = \frac{1}{T_0^2}, a_2 = \frac{2c}{T_0^2}, a_3 = 1 - \frac{c^2}{T_0^2}. \quad (10.9)$$

Минимизация данного функционала  $J$  по параметрам, задающим эллипс, позволяет определить локальное значение периода рассматриваемого колебания, а также выделить медленно изменяющуюся постоянную составляющую.

Существует, однако, нюанс. Параметры  $a_i$  не являются независимыми – они выражаются через  $T_0$  и  $c$ . Однако, если проводить минимизацию функционала по последним двум параметрам, то это приведет к нелинейным уравнениям. Поэтому при минимизации функционала (10.8) целесообразно рассматривать параметры  $a_i$  как независимые.

Законность данной процедуры можно обосновать следующим образом. С помощью метода наименьших квадратов можно проводить любую кривую второго порядка, в том числе, и описываемую указанным набором дополнительных параметров. При этом выполнение соотношений (10.9) допустимо рассматривать как дополнительный критерий того, что данный фрагмент кривой действительно описывается эллипсом вида (10.6).

Дифференцируя  $J$  по каждому из параметров  $a_i$ , получаем уравнения на искомые параметры

$$\frac{dJ}{da_1} = 2 \sum x_i^2 (y_i^2 + a_1 x_i^2 + a_2 x_i - a_3) = 0 \quad (10.10)$$

$$\frac{dJ}{da_2} = 2 \sum x_i (y_i^2 + a_1 x_i^2 + a_2 x_i - a_3) = 0 \quad (10.11)$$

$$\frac{dJ}{da_3} = -2 \sum (y_i^2 + a_1 x_i^2 + a_2 x_i - a_3) = 0 \quad (10.12)$$

Это – обычная система трех линейных уравнений, которые также могут быть записаны в форме

$$\begin{aligned} C_1 + a_1 B_{11} + a_2 B_{12} - a_3 B_{13} &= 0 \\ C_2 + a_1 B_{21} + a_2 B_{22} - a_3 B_{23} &= 0 \\ C_3 + a_1 B_{31} + a_2 B_{32} - a_3 B_{33} &= 0 \end{aligned} \quad (10.13)$$

где

$$C_1 = \sum x_i^2 y_i^2; B_{11} = \sum x_i^4; B_{12} = \sum x_i^3; B_{13} = \sum x_i^2$$

$$C_2 = \sum x_i y_i^2; B_{21} = \sum x_i^3; B_{22} = \sum x_i^2; B_{23} = \sum x_i \quad (10.14)$$

$$C_3 = \sum y_i^2; B_{31} = \sum x_i^2; B_{32} = \sum x_i; B_{33} = N$$

где  $N$  – число точек, по которым проводится фрагмент эллипса.

Решая систему уравнений (10.13) с коэффициентами (10.14), вычисленными на основании экспериментальных данных, получаем набор параметров  $a_i$ .

Данная задача решается стандартными программными средствами. Пока же рассмотрим, как именно выбор макроскопических шоков и переходных процессов может повлиять на получаемые результаты.

На рис.10.6а показан результат отделения составляющей, обусловленной макроскопическим шоком, от зависимости числа транзакций от времени. Кривая 1 на данном рисунке – это исходная зависимость, кривая 2 отражает использованную зависимость, отражающую макроскопический шок, кривая 3 – упомянутый выше результат.

Расчет кривой 2 велся при помощи соотношения (10.2), конкретные значения параметров, определенных из эвристических соображений, показаны в Таблице 10.2

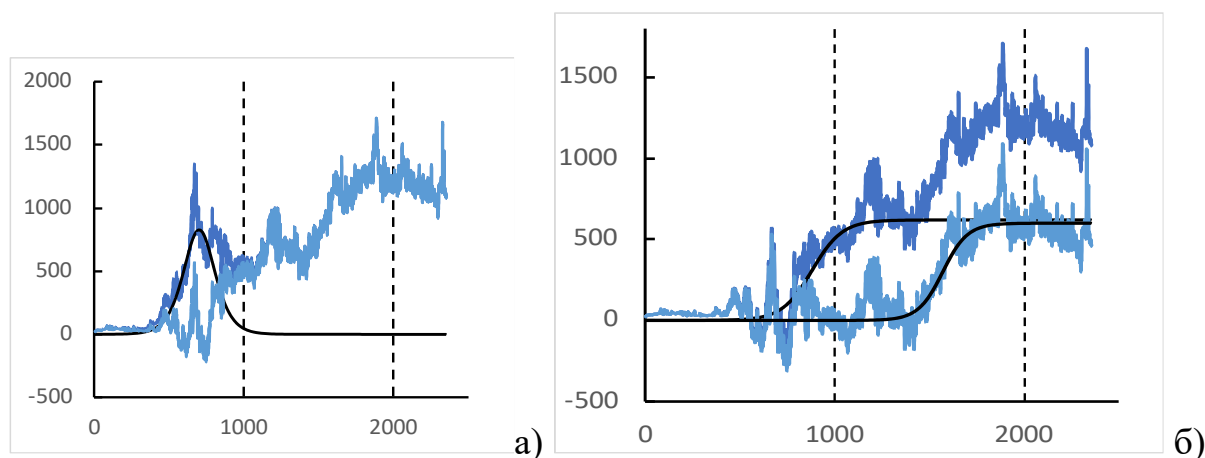


Рисунок 10.6 – Результат отделения составляющей, отвечающей макроскопическому шоку для зависимости транзакций от времени (а), результат дальнейшего отделения двух переходных процессов (б).

Таблица 10.2. Параметры кривых, рис. 3.3.2.

Параметры	$A_i$	$t_{0i}$ , дни	$T_i$ , дни
Кривая 2, рис. а).	260000	700	70
Кривая 2, рис. б).	620	880	80
Кривая 4, рис. б).	600	1570	65

На рис. 10.6б показан результат отделения еще двух составляющих, отвечающих переходным процессам (построение, аналогичное представленному на рис.10.2). Кривая 1 на данном рисунке – результат отделения составляющей, отвечающей макроскопическому шоку, кривая 2 – составляющая, отвечающая первому переходному процессу, кривая 4 – второму. Результат отделения составляющей, отвечающей первому переходному процессу, – кривая 3. Параметры, по которым велся расчёт кривых, отвечающих переходным процессам, представлены в Таблице 10.2.

Можно видеть, что отделение составляющей, отвечающей макроскопическому шоку, делает более наглядным существование двух переходных процессов.

Результат отделения всех трех макроскопических составляющих показан на рис. 10.7а. На рис. 10.7б показан результат применения процедуры частотной фильтрации к полученной зависимости. Можно видеть, что полученная кривая намного ближе к периодическому сигналу, нежели ее аналог, представленный на рис. 10.3б. Это означает, что действительно оказывается важным не только учет переходных процессов (качественного изменения рассматриваемой системы, но и воздействий, продолжающихся относительно короткое время).

Результат дальнейшего отделения квазипериодической составляющей, представленной на рис. 10.7б, показан на рис. 10.8а, а на рис. 10.8б представлен фазовый портрет кривой, показанной на рис. 10.7б.

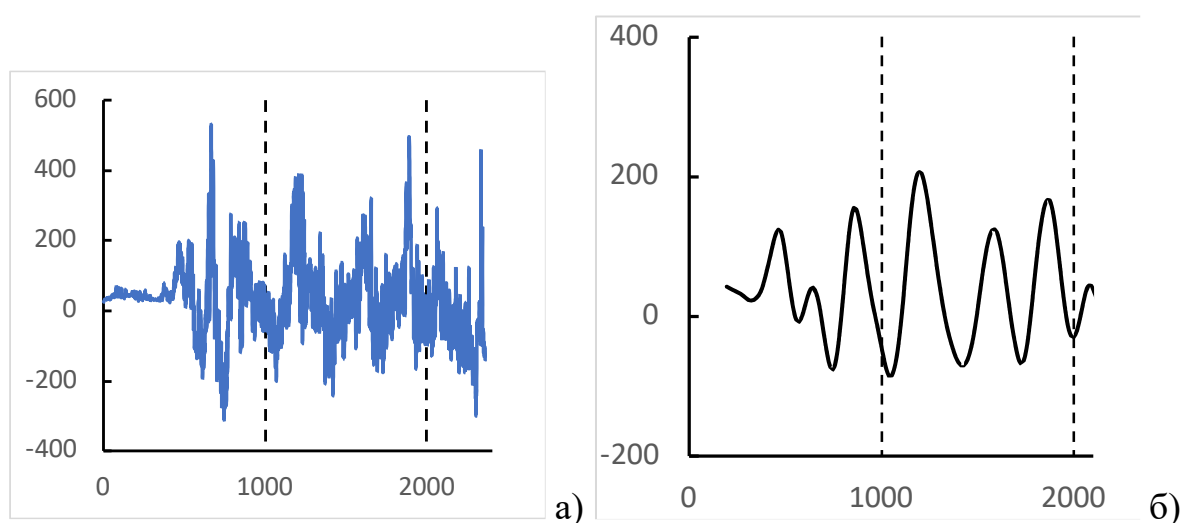


Рисунок 3.3.7 – Результат отделения трех составляющих, отвечающих макроскопическим процессам для зависимости транзакций от времени (а), результат применения процедуры частотной фильтрации полученной кривой (б).

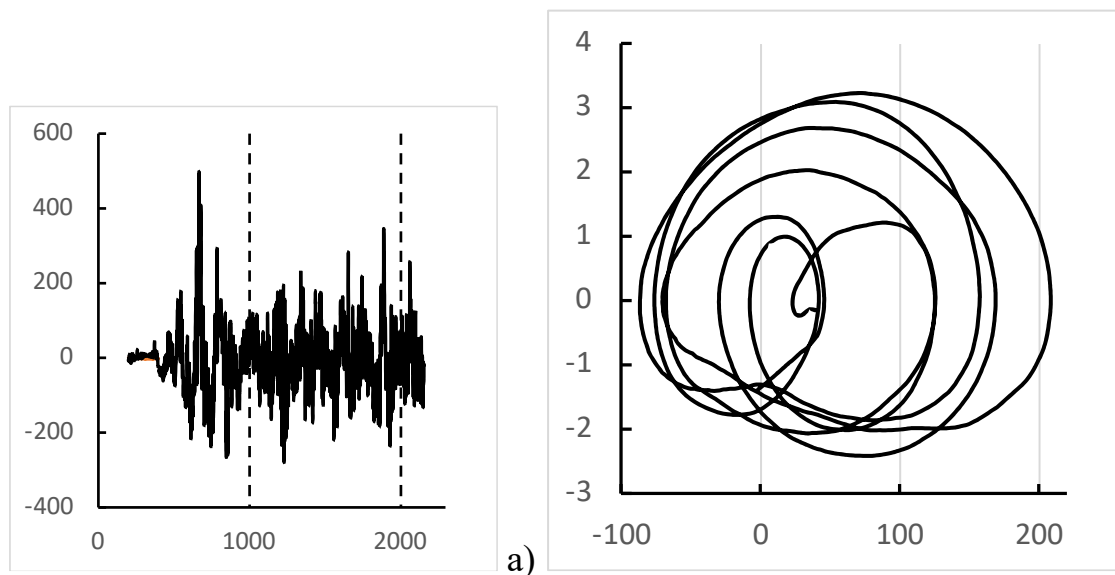


Рисунок 10.8 – Результат дальнейшего отделения квазипериодической составляющей, представленной на рис.10.7а (а), фазовый портрет составляющей, представленной на рис.10.7а (б).

Полученные результаты также демонстрируют важность учета воздействий макроскопического (применительно к рассматриваемой системе) характера: фазовый портрет намного ближе к совокупности эллипсов, нежели полученный ранее аналог.

На рис.10.9 показан результат выделения составляющих рассматриваемой зависимости (после отделения составляющих, отвечающих макроскопическим воздействиям), лежащих в диапазоне частот, отвечающих периодам 10 дней и 30 дней. С точки зрения аналогии с радиотехникой, это отвечает применению полосового частотного фильтра с верхней и нижней границами, отвечающими указанным периодам.

«Полосовой фильтр» реализован следующим образом. К кривой, представленной на рис.10.7а, применен также «фильтр низких частот» (результат показан на 10.10) с граничной частотой, отвечающей периоду 10 дней.

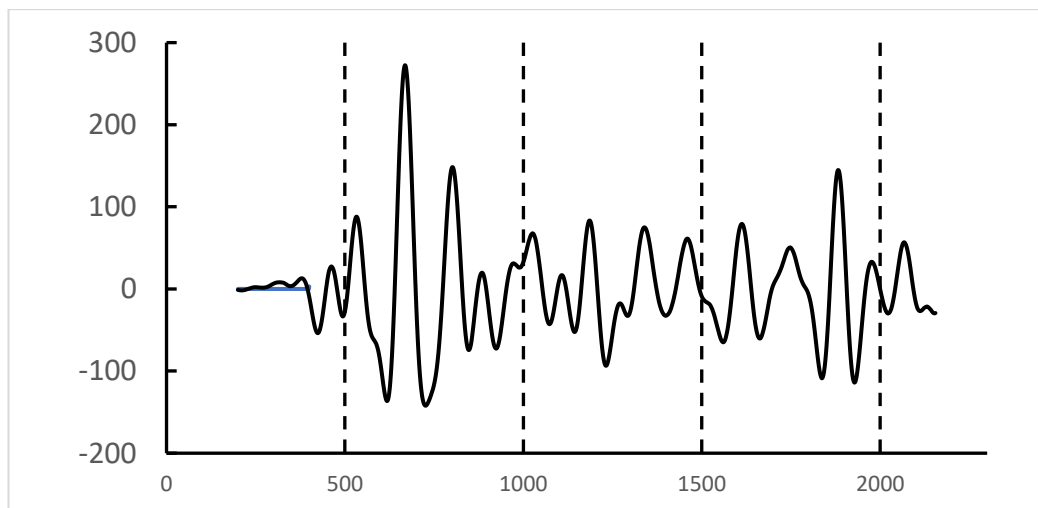


Рисунок 10.9 – Результат применения «полосового фильтра» к зависимости, показанной на рис. 10.7а. Верхняя и нижняя граница отвечают периодам 10 и 30 дней.

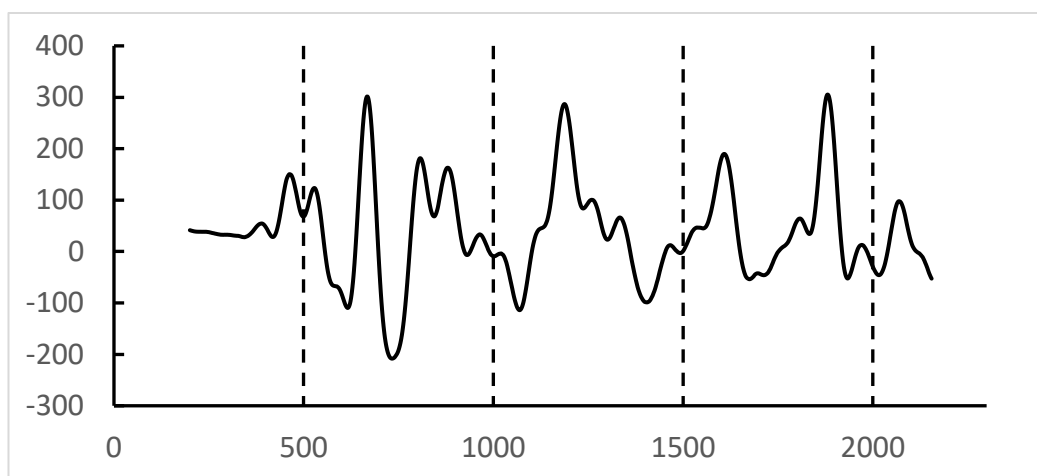


Рисунок 10.10. Результат применения «фильтра низких частот» к зависимости, показанной на рис. 10.7а. Граница по частоте отвечает периоду 10 дней.

Затем вычислена разность между «сигналами», прошедшими через «фильтры низких частот», с граничными частотами, отвечающими 30 и 10 дней.

Можно видеть, что полученный результат весьма близок к модулированному (по частоте и амплитуде) колебанию, что также подтверждает рис. 3.3.11.

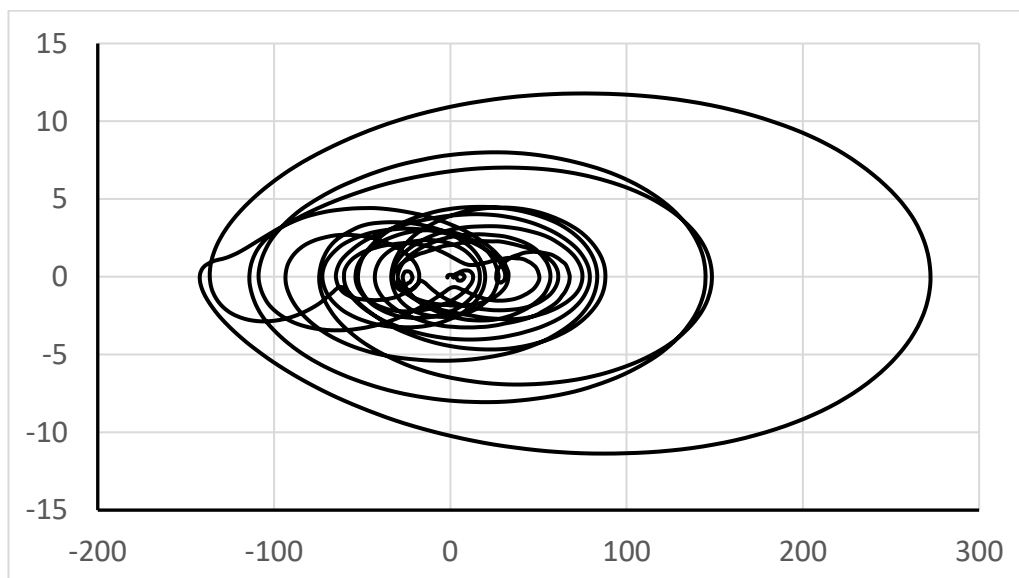


Рисунок 10.11 – Фазовый портрет колебания, представленного на рис. 10.9.

Фазовые портреты, представленные выше, позволяют применить к анализу рассматриваемых процессов подход, предложенный в главе 9. Действительно, в

данном случае отдельные фрагменты полученных кривых хорошо аппроксимируются эллипсами, что видно непосредственно из рисунков. Следовательно, от полученных зависимостей допустимо перейти к зависимостям, характеризующим параметры данного эллипса.

Соответствующие кривые уже можно отнести к медленно изменяющимся и применить к ним методику, аналогичную предложенной в главе 9.

Покажем теперь, что описание любых процессов, приведенных к форме, в которой моделью сигнала являются функции, принимающие значения в полях Галуа, может быть сведено к сугубо логическим операциям.



## **11. Поля Галуа и методологические аспекты решения физических задач в терминах многозначных логик**

Как было показано в предыдущих разделах, в настоящее время есть фундаментальные предпосылки для того, чтобы осуществить определенный синтез физики, теории информации и прикладной философии. В качестве примера рассмотрим методологические основания теории качественного решения дифференциальных уравнений. Они, как известно, состоят в следующем. Для решения многих задач не так важно знать конкретный вид решения того или иного дифференциального уравнения. Часто основной интерес представляет установление значений управляющих параметров, при которых в системе происходят качественные изменения (точки бифуркации). Для их отыскания часто не обязательно отыскивать решения, достаточно качественно проанализировать трансформации фазовых портретов при изменениях управляющих параметров.

Логичным продолжением этого (и аналогичных ему) подходов является следующая постановка вопроса: целесообразно разработать такие инструменты решения физических задач, которые предоставят только тот объем информации, который реально необходим для тех или иных конкретных целей. Еще одной иллюстрацией к адекватности именно такой постановки вопроса является ситуация, частот складывающаяся при численном решении сложных систем уравнений, например, описывающих процессы в атмосфере. Зачастую полученные решения также сложны для анализа, как и экспериментальные данные.

***Парадоксально, но отсюда следует, что те задачи из области физики (и не только), которые ранее формулировались на языке уравнений, которым подчиняются функции, описывающие физические явления и процессы, целесообразно формулировать на языке логики.***

Рассмотрим, какие для этого существуют предпосылки.

В современных информационных технологиях, как правило, используются сигналы, которым приписывается определённое дискретное значение. Типичным примером является сигнал, преобразовываемый аналого-цифровым преобразователем. В этом случае диапазон изменения амплитуд сигнала подразделяется на определенные интервалы, каждому из которых ставится в соответствие определенное двоичное число.

При этом, диапазон изменения сигналов, используемых в реальных устройствах, является конечным. Иными словами, если сигнал преобразуется в двоичную форму, то его моделью, де-факто служит функция, принимающая значения на некотором конечном множестве.

Это позволяет сделать следующий вывод [40]. Как правило, моделями сигналов, служат функции, принимающие значения на множестве действительных чисел. Для этой ситуации также справедлива аргументация, использованная выше. Действительные числа – это математический объект,

обеспечивающий отображение реального физического процесса на некую идеализацию, которая отсутствует в реальности. С таким же успехом для отображения (описания) реальных физических процессов можно использовать и другие математические объекты. В частности, если речь идет о сигналах, принимающих значения на некотором конечном множестве, то в качестве такого множества может быть выбрано поле Галуа [40].

С технической точки зрения, различие между традиционно используемыми процедурами, основанными на двоичной логике, и процедурами, основанными на использовании небинарных полей Галуа, состоит только в том, на какое число подынтервалов подразделяется интервал изменения амплитуд сигнала. Традиционно, число таких уровней равно  $2^n$ . При использовании же полей Галуа, отличающихся от  $GF(2^n)$ , число таких уровней может быть другим (например, в работе [40] рассматривался случай  $GF(17)$ ), но это – не более чем вопрос соглашения.

Все эти рассуждения применимы и к физическим процессам, в которых изменение параметров происходит в конечном диапазоне.

Следовательно, с общеметодологической точки зрения дискретизация по уровням «сигнала» означает, что моделью физического явления вовсе не обязательно должна быть функция действительного или комплексного переменного, принимающая значения на множестве комплексных или действительных чисел. Существуют условия, при которых моделью физического процесса может служить функция, принимающая значения в некотором поле Галуа, аргументом которой также являются элементы поля Галуа.

Этот факт создает предпосылки для того, чтобы вместо традиционных уравнений, призванных описать физические процессы, перейти к соотношениям, записываемым в терминах многозначной логики. Покажем это.

Переменным двоичной логики могут быть поставлены в соответствие элементы поля Галуа  $GF(2)$ , т.е. 0 и 1. Точно так же переменным многозначной логики ( $p$ -логики) можно поставить в соответствие элементы поля Галуа  $GF(p)$ . В текущей литературе функции, аргументами которых являются переменные многозначной логики, как правило, описываются через таблицы истинности. Но, это не является обязательным. Так, хорошо известен полином Жегалкина, позволяющий перейти от таблиц истинности к алгебраическим выражениям применительно к функциям, аргументом которых являются переменные двоичной логики. Не составляет труда построить аналогичный полином и для  $p$ -логики.

Будем для примера рассматривать случай произвольной функции  $f(x, y)$ , принимающей значения в поле  $GF(p)$ , где  $x, y$  – элементы того же поля Галуа. Этой функции соответствует таблица истинности, заданная упорядоченным перечислением элементов  $f(x_i, y_j)$ ,  $i, j = 0, 2 \dots p - 1$ .

Рассмотрим следующее выражение

$$g_i(x) = 1 - (x - x_i)^{p-1} \quad (11.1)$$

Из теории полей Галуа известно, что все ненулевые элементы поля  $GF(p)$  являются корнями уравнения

$$\theta^{p-1} - 1 = 0 \quad (11.2)$$

Т.е. любой ненулевой элемент поля  $GF(p)$ , будучи возведенным в  $p - 1$ -ю степень, дает единицу.

Следовательно, функции  $g_i(x)$  обладают следующим свойством

$$g_i(x) = \begin{cases} 1, & x = x_i \\ 0, & x \neq x_i \end{cases} \quad (11.3)$$

Сформируем следующий полином

$$F(x, y) = \sum_{i,j=0}^{p-1} f(x_i, y_j) g_i(x) g_j(y) \quad (11.4)$$

где величины  $f(x_i, y_j)$  формируют таблицу истинности, аналогичную указанной выше.

При подстановке в выражение (11.4) конкретной пары  $x_{i_0}, y_{j_0}$  значений логических переменных (точнее, соответствующих им элементов поля Галуа), все слагаемые, фигурирующие в сумме в правой части формулы (11.4) в силу соотношения (11.3) обращаются в ноль, за исключением слагаемого, для которого выполняется  $i = i_0, j = j_0$ . Следовательно, имеет место

$$F(x_{i_0}, y_{j_0}) = f(x_{i_0}, y_{j_0}) \quad (11.5)$$

Видно, что полином (11.4) выполняет для многозначной логики те же функции, что полином Жегалкина для двоичной логики, т.е. данное соотношение указывает конкретную алгебраическую функцию, которая реализует заданную таблицу истинности. Видно также, что соотношение (11.4) допускает обобщение на случай произвольного числа логических переменных.

Пользуясь этим аппаратом, далее можно перейти к построению любых моделей физических процессов, т.е. задача о сведении описания физических моделей к чисто логическому описанию действительно является решаемой.

## **Заключение**

Авторы отдадут себе отчёт в том, что материалы этой книги во многом являются дискуссионными. Тем не менее, мы считаем свою задачу выполненной.

Мы показали, что можно перекинуть мост от современных подходов, развитых в философии информации, к реальным практическим результатам.

Соответственно, мы рассматриваем эту монографию не столько как некое отражение уже полученных результатов, сколько как своего рода призыв, обращенный в том числе и к молодым ученым, задуматься над целым рядом вполне неординарных проблем, которые ставит перед нами современный этап развития человеческой цивилизации.

Мир захлестывает вал информации. Это уже давно стало общим местом, и с этим пытаются что-то делать. Выдвинуты такие концепции как Big Data, Data Mining и так далее. Однако все эти концепции носят, по существу, чисто технический характер, им недостаёт методологической базы, и поэтому результаты здесь остаются, мягко говоря, скромными.

Такую базу, как показано, в данной книге, можно развить, отталкиваясь от тезиса о цифровом бессмертии, который вполне может послужить мощным мотивирующим фактором для проведения дальнейших работ, отталкивающихся от концепции конвергенции гуманитарного и естественнонаучного знания.

Действительно, в современных условиях как никогда требуется некая сверхзадача, которая способна консолидировать усилия или большого количества ученых, прежде всего молодых. Работать над частной задачей часто просто скучно, тем более если она плохо оплачивается.

Вместе с тем, как однозначно свидетельствует история науки, сверхзадача, которая на первых этапах часто выглядит недостижимой и нерешаемой, очень часто вела талантливых людей вперёд. В этом отношении достаточно упомянуть имя только одного человека – Тихо Браге. Он, отталкиваясь от астрономических наблюдений, пытался раскрыть план, в соответствии с которым творец создал Вселенную.

В современных условиях поиск именно сверхзадачи остро необходим.

На страницах этой монографии мы показали, что такая сверхзадача может быть сформулирована и более того, что она может быть решена не такими уж сложными средствами.

Впрочем, результаты, полученные в данной монографии, имеют и непосредственно прикладной характер. С их помощью можно создавать программные продукты, которые позволяют анализировать поведение систем самой различной природы, начиная от полимерных гидрогелей и заканчивая процессами, которые происходят на рынке криптовалют.

Подчеркиваем, что отстаиваемые нами философские положения позволяют с единообразных позиций посмотреть на процессы самой различной природы.

Точнее, мы отстаивали вполне определенную точку зрения. Одним из инструментов междисциплинарного взаимодействия является в том числе и

сугубо информационный подход. Важно понять, какую конкретно информацию несут в себе экспериментальные данные различной природы.

Как показано в материалах данной книги очень часто объём информации, который кажется гигантским, на самом деле может быть редуцирован к существенно меньшей выборке.

Для этого нужно просто правильно использовать методологию. Подчеркнём еще раз, что, когда мир залит волной информации такой подход становится остро необходимым.

## Литература

1. Карпенко А. С. Современные исследования в философской логике // Вопросы философии. – 2003. – Т. 9. – С. 54-75.
2. Формирование исследовательских программ как задача прикладной философии / Е. С. Витулева, О. А. Габриелян, П. Е. Григорьев [и др.] // Практическая философия: состояние и перспективы: сборник материалов научной конференции, Симферополь, 27–28 мая 2021 года. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал». – 2021. – С. 140-156.
3. С. Н. Гринченко О системной иерархии искусственного интеллекта”, Информация и её применение. – 2021. – 15:1. – С. 111–115.
4. Куликов Д. К. Особенности мышления, или зеркало самосознания для искусственного интеллекта // Инженерный вестник Дона. – 2014. – Т. 32. – № 4-2. – С. 30.
5. Войскунский А. Е. Психология и искусственный интеллект: новый этап старого взаимодействия // Психология человека как субъекта познания, общения и деятельности/Отв. ред. ВВ Знаков, АЛ Журавлев. М.: Изд-во «Институт психологии РАН. – 2018. – С. 2094-2101.
6. Финн В. К. К структурной когнитологии: феноменология сознания с точки зрения искусственного интеллекта // Вопросы философии. – 2009. – №. 1. – С. 88-103.
7. Михайлов И. Ф. "Искусственный интеллект" как аргумент в споре о сознании // Epistemology & Philosophy of Science. – 2012. – Т. 32. – №. 2. – С. 107-122.
8. Когнитивные процессы и искусственный интеллект / С. Ю. Нарциссова, В. П. Сиротин, С. В. Куликова [и др.]. – Москва: Академия МНЭПУ. – 2020. – 271 с.
9. Корниенко А. Ф. Сущность процессов мышления и мыслительной деятельности / А. Ф. Корниенко // Научный диалог. Психология. Педагогика. – 2013. – № 4 (16) – С. 49–62.
10. Гинецинский В. И. Пропедевтический курс общей психологии: учебное пособие / В. И. Гинецинский. – Санкт-Петербург: Изд-во С.-Петерб. ун-та. – 1997. – 200 с.
11. Аблеев С.Р. Моделирование сознания и искусственный интеллект: пределы возможностей // Вестник экономической безопасности. – 2015. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-soznaniya-i-iskusstvennyy-intellekt-predely-vozmozhnostey> (дата обращения: 27.03.2022).
12. Гарднер Г. Структура разума: теория множественного интеллекта. – М.: ИД Вильямс. – 2007. – 512 с.
13. Калинина Е. Э. Теория множественного интеллекта в обучении иностранным языкам // Вопросы лингводидактики и методики преподавания иностранных языков. – 2016. – С. 34-38.
14. Ароновская Е. Л. Структура личности и подсознание // Психология и педагогика в системе гуманитарного знания. – 2014. – С. 11-18.

15. Гришина Н. В., Костромина С. Н., Мироненко И. А. Структура проблемного поля современной психологии личности //Психологический журнал. – 2018. – Т. 39. – №. 1. – С. 26-35.
16. Рыжов Б. Н. Системная структура личности //Системная психология и социология. – 2017. – №. 3. – С. 5-11.
17. Клайн М. Математика. Утрата определенности: пер. с англ. / под. ред. И.М. Яглома. – М.: Мир. – 1984. – 434 с.
18. Мотрошилова Н. В. «Воображаемая логика» Н.А. Васильева и вклад В.А. Смирнова в ее исследование //Философия науки и техники. – 1998. – Т. 4. – №. 1. – С.192-201.
19. Lukasiewicz J. On Three-Valued Logic Jan Lukasiewicz. Selected Works Ed. by L. Borkowski. Amsterdam: North-Holland. – 1970. – p. 87–88.
20. Карпенко А. С. Развитие многозначной логики. М.: изд-во ЛКИ, 2010, 448 с.
21. Suleimenov I.E., Vitulyova Y.S., Bakirov A.S., Gabrielyan O.A. Artificial Intelligence: What is it? ACM International Conference Proceeding Series. – 2020. – p. 22–25. doi:10.1145/3397125.3397141
22. Suleimenov I.E., Gabrielyan O.A., Bakirov A.S., Vitulyova Ye. S., Dialectical Understanding of Information in the Context of the Artificial Intelligence Problems, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019 – 630. doi: 10.1088/1757-899X/630/1/012007
23. Vitulyova Y.S., Bakirov A.S., Baipakbayeva S.T., Suleimenov I.E., Interpretation of the category of complex in terms of dialectical positivism. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 946(1). –p. 012004. doi:10.1088/1757-899X/946/1/012004
24. Lévy-Bruhl L. Le surnaturel et la nature dans la mentalité primitive. Presses universitaires de France. – 1963.
25. Сулейменов И.Э., Табунщикова А.В. Структура современного медиапространства с точки зрения нейросетевой теории ноосферы // Известия НТО «Кахак». – 2021. – № 4(75). – С. 58-77.
26. Сулейменов И.Э., Габриелян О.А., Мун Г.А. Тезис о цифровом бессмертии и новая парадигма высшей школы // Известия НТО «Кахак». – 2021. – № 4(75). – С. 46-57.
27. Bakirov A. S., Vitulyova Y. S., Zotkin A. A., and Suleimenov I. E.: Internet users' behavior from the standpoint of the neural network theory of society: prerequisites for the meta-education concept formation Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVI-4/W5-2021. – 2021 – p. 83–90, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W5-2021-83-2021>.
28. Suleimenov, I. E., Matrassulova, D. K., Moldakhan, I., Vitulyova, Y. S., Kabdushev, S. B., & Bakirov, A. S. Distributed memory of neural networks and the problem of the intelligence's essence. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2022. – 11(1).

29. Suleimenov I., Panchenko S., Gabrielyan O., & Pak I. Voting procedures from the perspective of theory of neural networks. *Open Engineering*. – 2016. – 6(1). <https://doi.org/10.1515/eng-2016-0048>
30. Сулейменов И. Э., Панченко С. В., Габриелян О. А. Процедура голосования с точки зрения теории нейронных сетей // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Философия. Политология. Культурология. – 2017. – Т. 3. – №. 1. – С. 91-99.
31. Бетильмерзаева М. М. К вопросу о коммуникативной природе мышления // Общество: философия, история, культура. – 2020. – № 6 (74). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-kommunikativnoy-prirode-myshleniya-1> (дата обращения: 27.03.2022).
32. Кравцова Е. Е. Неклассическая психология Л.С. Выготского // Национальный психологический журнал. – 2012. – №. 1. – С. 61-66.
33. Ключко В. Е. Проблема сознания в психологии: постнеклассический ракурс // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. – 2013. – №. 4. – С. 20-35.
34. Assaf R., Schumann A. Explainable Deep Neural Networks for Multivariate Time Series Predictions // *IJCAI*. – 2019. – P. 6488-6490.
35. Angelov P., Soares E. Towards explainable deep neural networks (xDNN) // *Neural Networks*. – 2020. – Т. 130. – С. 185-194.
36. Dosilovic, Filip Karlo et al. Explainable artificial intelligence: A survey // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). – 2018. – P. 0210-0215.
37. Gunning D. et al. XAI Explainable artificial intelligence // *Science Robotics*. – 2019. – Т. 4. – №. 37. – P. 1-5.
38. Arrieta A. B. et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI // *Information Fusion*. – 2020. – Т. 58. – P. 82-115.
39. Guidotti R., Monreale A., Ruggieri S., Turini F., Giannotti F., Pedreschi D. A survey of methods for explaining black box models // *ACM computing surveys (CSUR)*. – 2018. – № 51(5). – P. 1-42.
40. Vitulyova E.S., Matrassulova D.K., Suleimenov I.E. Application of Non-binary Galois Fields Fourier Transform for Digital Signal Processing: to the Digital Convolution Theorem // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. – 2021. – №3. – P. 1718-1726.
41. Мельников В. М., Юров И. А. Структура личности в отечественной психологии // *Известия Сочинского государственного университета*. – 2014. – № 4. (33) – С. 158-162.
42. Vitulyova Y.S., Bakirov A.S., Shaltykova D.B., Suleimenov I.E. Prerequisites for the analysis of the neural networks functioning in terms of projective geometry // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – № 946(1). – P. 012001.



43. Bakirov A.S, Suleimenov I.E. On the possibility of implementing artificial intelligence systems based on error-correcting code algorithms // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2021– № 99(1). – P. 83-99.
44. Gu J., Wang Z., Kuen J., Ma L., Shahroudy A., Shuai B., Liu T., Wang X., Wang G., Cai J., Chen T. Recent advances in convolutional neural networks // Pattern Recognition. – 2018. – T. 77. – P. 354-377.
45. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks //Advances in neural information processing systems. – 2012. – T. 25. – P. 1097-1105.
46. Moldakhan I., Matrassulova D. K., Shaltykova D.B., Suleimenov I.E. Some advantages of non-binary Galois fields for digital signal processing // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – № 2. – P. 871-877.
47. Monteiro A. et al. Embedded application of convolutional neural networks on Raspberry Pi for SHM // Electronics Letters. – 2018. – T. 54. – №. 11. – P. 680-682.
48. Shichijo S. et al. Application of convolutional neural networks in the diagnosis of Helicobacter pylori infection based on endoscopic images // EBioMedicine. – 2017. – T. 25. – P. 106-111.
49. Howard A. G. et al. Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications // arXiv preprint arXiv:1704.04861. – 2017. – P. 1-9.
50. Bai S., Kolter J.Z., Koltun V. An Empirical Evaluation of Generic Convolutional and Recurrent Networks for Sequence Modeling // arXiv:1803.01271. – 2018. – P. 1-14.
51. Xiang Zhang, Junbo Zhao, Yann LeCun Character-level Convolutional Networks for Text Classification // arXiv:1509.01626. – 2016. – P. 1-9.
52. McLaren M. et al. Application of convolutional neural networks to speaker recognition in noisy conditions // Fifteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. – 2014. – P. 686-690.
53. Suleimenov I., Guichard J. P., Baikenov A., Obukhova P., & Suleimenova K. Degradation of Higher Education in Kazakhstan as an example of post-transitional crisis. International Letters of Social and Humanistic Sciences. – 2015. – C. 54. – P. 26-33.
54. Suleimenova K. I., Obukhova P. V., Shaltykova D. B., & Suleimenov I. E. Post-transition period and quality of higher education: ways to overcome the crisis phenomena. International Letters of Social and Humanistic Sciences. – 2013. – №. 8. – P. 49-56.
55. Мун Г. А., Сулейменов И. Э. Интенсификация инновационной деятельности как социокультурная проблема // Известия НТО «КАХАК. – 2019. – №. 2. – С. 51-63.
56. Мун Г. А., Масалимова А. Р., Тасбулатова З. С., & Сулейменов И. Э. Сопряжение учебного процесса со средствами противодействия «оранжевым революциям» на платформе новых информационных технологий. Вестник КазНУ. Серия психологии и социологии. – 2020. – 71(4). – С. 66-75.

57. Мун Г.А., Сулейменов И.Э. Уроки алматинской трагедии: необходимость бескомпромиссной борьбы с псевдонаукой // Известия НТО «Кахак». – 2022. – № 1(76). – С. 4-26.

58. Сулейменов И.Э., Витулёва Е.С., Бакиров А.С., Кабдушев Ш.Б., Егембердиева З., Мун Г.А. Использование систем искусственного интеллекта в высшей школе: в поисках ответа на «вызов массовости» // Известия НТО «КАХАК». – 2019. – №4 (67). – С. 39-64.

59. Сулейменов И. Э., Габриелян О. А., Пак И. Т., Панченко С. В., & Мун Г. А. Инновационные сценарии в постиндустриальном обществе. Print Express. – 2016.

60. Сулейменов И. Э., Фалалеев А. П. Социоэкономические аспекты инновационной деятельности //Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И.Вернадского. Социология. Педагогика. Психология. – 2018. – Т. 4. – №. 1S. – С. 42-47.

61. Сулейменов И. Э., Витулёва Е. С., Шалтыкова Д. Б. Концепция ноосферного университета с точки зрения дуальной сущности интеллекта человека //Вестник Ивановского государственного университета. Серия: Гуманитарные науки. – 2022. – №. 1. – С. 141-151.

62. Пак И. Т., Мун Г. А., Витулёва Е. С., Кабдушев Ш. Б., Қадыржан Қ. Н., & Сулейменов И. Э. Проблема перехода к дистанционному обучению с точки зрения истории и философии науки. Известия научно-технического общества "КАХАК". – 2020. – № 3 (70). – С. 17.

63. Зарплата российского профессора в ее настоящем, прошлом и будущем: ALMA MATER. Вестник высшей школы / Шипилов А.В. – 2003. – №4. – С. 33-42.

64. Сулейменов И. Э., Нуртазин А. А., Габриелян О. А., Шалтыкова Д. Б., Тасбулатова З. С., & Панченко С. В. Бюрократия с точки зрения теории самоорганизации. Образовательные ресурсы и технологии – 2017. – № 2 (19). – С. 36-44.

65. Suleimenov I., Gabrielyan O., Mun G., Panchenko S., Amirzhan T., & Suleimenova K. Voting Procedure and Neural Networks. Int. J. on Communications. – 2014. – №3. – С. 16-20.

66. Weber Max. Wirtschaft und Gesellschaft. Grundriss der verstehenden Soziologie. revidierte Auf l. Besorgt von Johannes Winckelmann. Tübingen: J.C.B. Mohr (Paul Siebeck). – 1972.

67. Suleimenov I. E., Gabrielyan O. A., Malenko S. A., Vitulyova Y. S., & Nekita A. G. Algorithmic Basis of Battle Neural Networks And Crisis Phenomena In Modern Society. In D. Perishable and Eternal: Mythologies and Social Technologies of Digital Civilization, European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. – 2021. – vol 120. – P. 247-255.

68. Чернавский Д. С. Проблема происхождения жизни и мышления с точки зрения современной физики //Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170. – №. 2. – С. 157-183.

69. Chen J., Burgess P. The boundaries of legal personhood: how spontaneous intelligence can problematise differences between humans, artificial intelligence, companies and animals. *Artificial Intelligence and Law*. – 2018. – P. 1-20.
70. Kalimoldayev M. N., Pak I. T., Baipakbayeva S. T., Mun G. A., Shaltykova D. B., & Suleimenov I. E. Methodological basis for the development strategy of artificial intelligence systems in the Republic of Kazakhstan. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of the Kazakhstan – Series of geology and technical sciences*. – 2018. – № 6. – P. 47-54.
71. Eliade M. *The myth of the eternal return: Cosmos and history* Princeton University Press. – 2021. – Vol. 122.
72. Mun G.A., Moldakhan I., Serikbay A.M., Kaldybekov D., Suleimenov I.E. and Park K. Hydrophilic interpolymer associates—the key to solving the problem of pre-biological evolution // *International Journal of Biology and Chemistry*. – 2020. – P. 4-13.
73. Пальчунов Д.Е. Моделирование мышления и формализация рефлексии. I: Теоретико- модельная формализация онтологии и рефлексии // *Философия науки*. – 2006. – № 4 (31). – С. 86–114.
74. Caret C. Hybridized paracomplete and paraconsistent logics. *The Australasian Journal of Logic*. – 2017. – № 14(1).
75. Abe J. M., Nakamatsu K., & da Silva Filho J. I. Three decades of paraconsistent annotated logics: a review paper on some applications. *Procedia Computer Science*. – 2019. – 159 – P. 1175-1181.
76. Bofill M., Manyà F., Vidal A., & Villaret M. New complexity results for Łukasiewicz logic. *Soft Computing*. – 2019. – № 23(7) – P. 2187-2197.
77. Kulik B. A. N-tuple algebra-based probabilistic logic. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – 2007. – № 46(1). – P. 111-120.
78. Marcos J. On a Problem of da Costa // *Essays on the Foundations of Mathematics and Logic 2* / Ed. by G. Sica. Polimetrica. – 2005. – P. 53-69.
79. Максимов Д. Ю. Логика Н.А. Васильева и многозначные логики // *Логические исследования*. – 2016. – Т. 22. – №. 1.
80. Посягин А.И., Южаков А.А. Разработка канального цифрового преобразователя на основе нейронной сети // *Электротехника*. – 2011. – № 11. – С. 18–24.
81. Посягин А.И., Южаков А.А. Разработка двухслойной нейронной сети для самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети // *Электротехника*. – 2013. – № 11. – С. 10-13.
82. Зацаринный А. А. Научно-практические аспекты представления науки как отрасли цифровой экономики // *Радиолокация, навигация, связь*. – 2018. – С. 20-31.
83. Ахмад Х.М., Жирков В.Ф. Введение в цифровую обработку речевых сигналов // *Владимир. Изд-во Владим. гос. ун-та*. – 2007. – 192 с.
84. Suleimenov I., Bakirov A., & Moldakhan I. Formalization of ternary logic for application to digital signal processing. In *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. – 2019. – P. 26-35.

85. Jayathilake A. A., Perera A. A. I., & Chamikara M. A. P. Discrete Walsh-Hadamard transform in signal processing. *IJRIT Int. J. Res. Inf. Technol.* – 2013. – № 1. – P. 80-89.
86. Lu Y., Desmedt Y. Walsh transforms and cryptographic applications in bias computing. *Cryptography and Communications.* – 2016. – № 8(3). – P. 435-453.
87. Dokur Z., Ölmez T. Heartbeat classification by using a convolutional neural network trained with Walsh functions. *Neural Computing and Applications.* – 2020. – P. 1-20.
88. Dutkay D. E., Picioroaga G. Generalized Walsh bases and applications. *Acta applicandae mathematicae.* – 2014. – № 133(1). – P. 1-18.
89. Irion J., Saito N. The generalized Haar-Walsh transform. In 2014 IEEE Workshop on Statistical Signal Processing (SSP). 2014. – P. 472-475.
90. Suleimenov I. E., Budtova T., Adil'Bekov S. A., Pereladov I. Y., & Bekturov E. A. Application of the method of phase portraits to the analysis of the kinetics of redistribution of metal ion concentrations in the polyelectrolyte hydrogel-multicomponent solution system. *Polymer Science Series A/Vysokomolekulyarnye Soedineniya, Ser. A.* – 2004. – № 46(8). – P 797.
91. Suleimenov I., Shaltykova D., Sedlakova Z., Mun G., Semenyakin N., Kaldybekov D., & Obukhova P. Hydrophilic interpolymer associates as a satellite product of reactions of formation of interpolymer complexes. In *Applied Mechanics and Materials.* – 2014. – Vol. 467. – P. 58-63.
92. Dergunov S. A., Mun G. A., Dergunov M. A., Suleimenov I. E., & Pinkhassik E. Tunable thermosensitivity in multistimuli-responsive terpolymers. *Reactive and Functional Polymers.* – 2011. – № 71(12). – P. 1129-1136.
93. Ергожин, Е. Е., Зезин, А. Б., Сулейменов, И. Э., Мун, Г. А. (2008). Гидрофильные полимеры в нанотехнологии и наноэлектронике. Библиотека нанотехнологии. Алматы-Москва: LEM. – 2008. – № 1. – P. 216.
94. Suleimenov I., Mun G., Ivlev R., Panchenko S., & Kaldybekov D. Autooscillations in Thermo-responsive Polymer Solutions as the Basis for a New Type of Sensor Panels. *AASRI Procedia.* – 2012. – № 3. – P. 577-582.
95. Suleimenov I. E., Panchenko S. V., Sedlakova Z., & Park I. T. Composite Polymer Materials for Image Reproduction Systems on the Basis of Thermo-induced Phase Transitions. *Recent Contributions to Physics (Rec. Contr. Phys).* – 2015. – № 55(4). – P. 114-120.
96. Hsu Y. H., Chiang W. H., Chen M. C., Chern C. S., & Chiu H. C. Effects of SDS on the thermo-and pH-sensitive structural changes of the poly (acrylic acid)-based copolymer containing both poly (N-isopropylacrylamide) and monomethoxy poly (ethylene glycol) grafts in water. *Langmuir.* – 2006. – № 22(16). – P. 6764-6770.
97. Rakhmetulayeva R. K., Azhkeyeva A. N., Yeligbayeva G. Z., Shaikhutdynov Y. M., Mun G. A., & Abutalip M. New thermo-sensitive hydrogel based on copolymer of 2-hydroxyethyl acrylate and ethyl acrylate. *Eurasian Chemico-Technological Journal.* – 2017. – № 19(1). – P. 47-55.
98. Jong K., Ju B. Thermo-responsive behavior of propynyl-containing hydroxyethyl starch. *Colloid and Polymer Science.* – 2017. – № 295(2). – P. 307-315.

99. Ermukhambetova B. B., Suleimenov I. E., Alikulov A. Z., Moldakhan I., Baipakbaeva S. T., & Mun G. A. On the Question of the Method for Determining the Critical pH Value during the Formation of Complexes between Nonionic Polymers and Polyacid in Aqueous Solutions. *Polymer Science, Series A*. – 2021. – № 63(1). – P. 8-14.
100. Демидов В. И., Колоколов Н. Б., Кудрявцев А. А. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. – М., Энергоатомиздат. – 1996. – 237 с.
101. Khutoryanskaya O. V., Mayeva Z. A., Mun G. A., & Khutoryanskiy V. V. Designing temperature-responsive biocompatible copolymers and hydrogels based on 2-hydroxyethyl (meth) acrylates. *Biomacromolecules*. – 2008. – № 9(12). – P. 3353-3361.
102. Suleimenov I. E., Guven O., Mun G. A., Uzun C., Gabrielyan O. A., Kabdushev S. B., & Nurtazin A. Hysteresis effects during the phase transition in solutions of temperature sensitive polymers. *Eurasian Chemico-Technological Journal*. – 2017. – № 19(1). – P. 41-46.
103. Haq M. A., Su Y., & Wang D. Mechanical properties of PNIPAM based hydrogels: A review. *Materials Science and Engineering*. – 2017. – № 70. – P. 842-855.
104. Budtova T., & Suleimenov I. Swelling behavior of a polyelectrolyte network under load. *Polymer*. – 1997. – № 38(24). – P. 5947-5952.
105. Shi Z., Gao X., Ullah M. W., Li S., Wang Q., & Yang G. Electroconductive natural polymer-based hydrogels. *Biomaterials*. – 2016. – № 111. – P. 40-54.
106. Kudaibergenov S. E., Sigitov V. B., Didukh A. G., Bekturov E. A., & Suleimenov I. E. Behavior of polyelectrolyte gels under the influence of dc electric and magnetic fields. *Polymers for Advanced Technologies*. – 2000. – № 11(8-12). – P. 805-809.
107. Singh N. K., Lee D. S. In situ gelling pH-and temperature-sensitive biodegradable block copolymer hydrogels for drug delivery. *Journal of Controlled Release*. – 2014. – № 193. – P. 214-227.
108. Suhail M., Fang C. W., Khan A., Minhas M. U., & Wu P. C. Fabrication and in vitro evaluation of pH-sensitive polymeric hydrogels as controlled release carriers. *Gels*. – 2021. – № 7(3). – P. 110.
109. Gharekhani H., Olad A., Mirmohseni A., & Bybordi A. Superabsorbent hydrogel made of NaAlg-g-poly (AA-co-AAm) and rice husk ash: Synthesis, characterization, and swelling kinetic studies. *Carbohydrate polymers*. – 2017. – № 168. – P. 1-13.
110. Kipcak A. S., Ismail O., Doymaz I., & Piskin S. Modeling and investigation of the swelling kinetics of acrylamide-sodium acrylate hydrogel. *Journal of Chemistry*. – 2014.
111. Suleimenov I. E., Budtova T. V., & Bekturov E. A. The kinetics of swelling of highly swelling hydrogels under the coexistence of two phases. *Polymer science. Series A*. – 2002. – № 44(9). – P. 1010-1015.

112. Budtova T., Suleimenov I., & Frenkel S. Peculiarities of the kinetics of polyelectrolyte hydrogel collapse in solutions of copper sulfate. *Polymer*. – 1995. – № 36(10). – P. 2055-2058.

113. Vasilevskaya V. V., Khalatur P. G., & Khokhlov A. R. Conformational polymorphism of amphiphilic polymers in a poor solvent. *Macromolecules*. – 2003. – № 36(26). – P. 10103-10111.

114. Murnen H. K., Khokhlov A. R., Khalatur P. G., Segalman R. A., & Zuckermann R. N. Impact of hydrophobic sequence patterning on the coil-to-globule transition of protein-like polymers. *Macromolecules*. – 2012. – № 45(12). – P. 5229-5236.