

## **ПРОЦЕССНАЯ СЕМАНТИКА КОМПЛЕКСНЫХ ЧИСЕЛ**

**И.А. Суров**

канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: ilya.a.surov@itmo.ru

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Ряд перспективных подходов к имитации естественного мышления строится с привлечением волновых и квантово-подобных моделей, позволяющих преодолеть ограничения булевой логики и классической теории вероятностей. Дальнейшее развитие этих направлений требует выявления причин, обуславливающих эти преимущества. В данной статье показано, что такой причиной является соответствие фундаментальных принципов естественного мышления алгебре комплексных чисел. В частности, установлено, что векторная структура этих чисел совпадает с универсальной когнитивной моделью процессов в природе. При этом различные фазы комплексного числа соответствуют этапам жизненного цикла соответствующей деятельности. В четырёхэтапной модели этапы «новость», «цель», «действие» и «результат» соответствуют фазам рассматриваемого процесса в обычном понимании этого выражения. При этом действительная и мнимая оси комплексной плоскости описывают фактическое и ожидаемое состояние результата процесса. Простота и универсальность представленной модели позволяют ей избежать ряда острых проблем современных подходов к формализации предсказательного кодирования когнитивной информации. Эти свойства открывают возможности для алгоритмической имитации процессного мышления и построения природоподобных вычислительных систем.

**Ключевые слова:** комплексные числа, семантика, процесс, предсказательное кодирование, прогнозное моделирование.

### **1. Введение**

Современные вычислительные системы преуспели в задачах распознавания, оптимизации, аппроксимации данных, композиции текстов и других тиражируемых задачах, для которых доступны большие массивы обучающих данных. Смысловой (семантический, когнитивный [1]) поиск и аналитика данных, напротив, поддаются алгоритмизации намного труднее и в настоящее время остаются прерогативой человека [2]. В условиях информационного взрыва, однако, скорости естественного мышления для решения этих задач оказывается недостаточно. Их частичная автоматизация является одним из важнейших элементов следующего техноуклада, строящегося вокруг когнитивно-семиотических технологий [3–5].

Для решения этой проблемы разрабатываются способы обработки информации на оптических, голографических и квантовых принципах, позволяющие имитиро-

вать особенности естественной памяти, восприятия, смыслообразования, рассуждения и принятия решений [6–8], не находящие выражения в нейросетевой парадигме. Эти разнородные подходы, однако, в основном используют трудновосприимчивые математические средства, что препятствует их развитию и взаимообогащению. Для решения этой проблемы желательно найти «общую точку» оптических, голографических и квантово-подобных алгоритмов обработки информации, позволившую бы совместить и развить отмеченные преимущества.

Искомая общность легко обнаруживается в соответствующих разделах физики, успешно применяемых для анализа информационных процессов [9]. Модели оптических и голографических вычислений описываются на основе физики электромагнитных волн, характерной явлениями интерференции и суперпозиции, а также ограниченной определённости наблюдаемых величин; то же самое верно для квантовой теории, первоначально известной как «волновая механика» [10, 11]. Математическим выражением этой общности является формализация соответствующих процессов с помощью комплексных чисел. Как в квантовой, так и в классической физике волн от них можно уйти ценой (иногда намного) более громоздкой действительной формы; краткость и простота выкладок именно в комплексной записи, тем не менее, указывают на глубинное соответствие комплексных чисел устройству природы.

Возможности использования комплексных чисел в алгоритмах искусственного интеллекта, однако, практически не изучены. Отмеченные подходы обходят этот вопрос стороной, обычно используя такие числа формально, что снижает теоретическую ценность и интерпретируемость получаемых моделей. Представленная в этой статье интерпретация комплексных чисел направлена на решение этой проблемы. В разделе 2 приведены основы комплекснозначного исчисления и рассмотрен его простейший физический прототип. В разделе 3 представлена структурная модель процесса, далее совмещённая со структурой комплексных чисел в разделе 4. В разделе 5 свойства представленной модели рассмотрены применительно к задаче прогнозного когнитивно-поведенческого моделирования.

## 2. Структура комплексных чисел и колебательный процесс

Любое комплексное число  $z = x + iy$  представляется в виде

$$z = Re^{i\phi}, \quad e^{i\phi} = \cos \phi + i \sin \phi, \quad (1)$$

где  $R \geq 0$  и  $0 \leq \phi \leq 2\pi$  есть амплитуда и фаза комплексного числа, как показано на рис. 1. При этом согласно свойствам тригонометрических функций  $e^{i\phi} = e^{i(\phi+2\pi)}$ , вследствие чего число (1) не меняется при изменении фазы на  $2\pi$  радиан (360 градусов). Таким образом, в отличие от амплитуды с линейным порядком значений, угловая координата  $\phi$  имеет круговую структуру.

Для интерпретации выражения (1) можно рассмотреть любую из множества задач, в которых комплексные числа возникают естественным образом. Простейшей среди них является задача о свободном гармоническом маятнике. В этой задаче инертное тело движется под действием упругой силы, пропорциональной его сме-

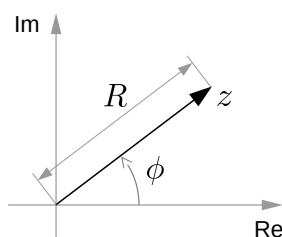


Рис. 1. Комплексная плоскость, образованная действительной (Re) и мнимой (Im) осями. Амплитуда и фаза комплексного числа (1) соответствуют длине и направлению вектора на этой плоскости

щению по оси  $X$ . Уравнение Ньютона такого движения имеет вид

$$\frac{d^2}{dt^2}x(t) + \omega^2x(t) = 0, \tag{2}$$

где  $\omega^2$  есть отношение жёсткости упругой силы к инерции системы. Решением этого уравнения является гармоническое колебание

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi_0) \tag{3}$$

с амплитудой  $A$ , частотой  $\omega$  и начальной фазой  $\phi_0$ , определение которых из начальных условий завершает решение задачи.

На практике параметры функции (3) обычно априори неизвестны. Напрямую измеряются лишь положения тел в отдельные моменты времени. Знание таких положений в один любой момент, однако, данные параметры найти не позволяет. Для этого координаты тел обычно дополняют информацией об их скорости  $v(t)$ , после чего знание пары величин  $(x, v)$  для каждого тела позволяет сделать прогноз их будущих координат (например, планет Солнечной системы) на основании законов механики.

В ходе гармонического колебания (3) скорость тела равна производной от этой функции по времени

$$v(t) = \frac{d}{dt}x(t) = -A\omega \sin(\omega t + \phi_0). \tag{4}$$

При этом движение маятника представляется на (фазовой) плоскости  $XV$  равномерным движением по круговой траектории, как показано на рис. 2б.

Комплексные числа используются для более компактного описания этого движения. При этом действительная координата  $x$  в уравнении (2) заменяется на комплексное число (1). Решением уравнения (2) тогда становится экспоненциальная функция с мнимым аргументом

$$z(t) = Ae^{i(\omega t + \phi_0)}, \quad x(t) = \text{Re}[z(t)], \tag{5}$$

где параметры  $A$ ,  $\omega$  и  $\phi_0$  сохраняют свои функции, тогда как исходное решение (3) равно действительной части (5) согласно тождеству Эйлера (1). При этом для нахождения скорости необязательно вводить новую тригонометрическую функцию,

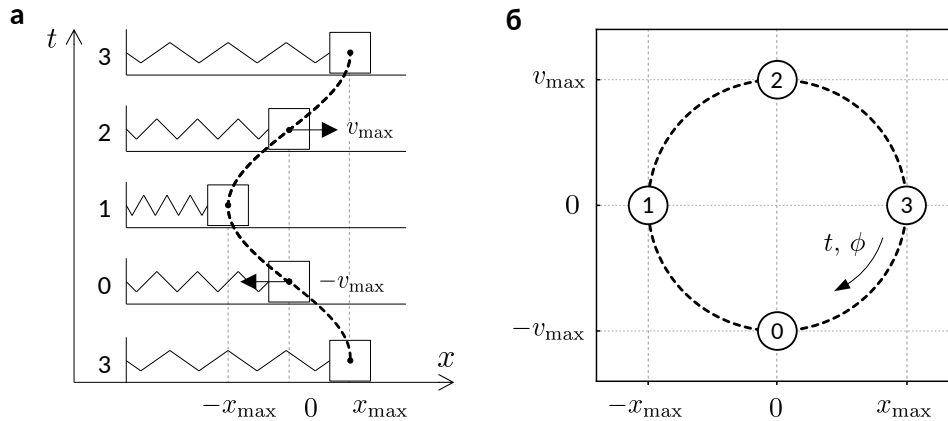


Рис. 2. (а) последовательные состояния пружинного маятника в ходе свободного гармонического колебания (3); (б) траектория гармонического колебания на фазовой плоскости координата-скорость согласно уравнениям (3) и (4) при нулевой начальной фазе  $\phi_0$

как это делается в обычном решении (4). В комплекснозначном случае взятие производной от функции (5) соответствует её домножению на мнимую константу  $i\omega$ , так что скорость движения

$$v(t) = \operatorname{Re}[i\omega * z(t)] = \omega * \operatorname{Im}[z(t)] \quad (6)$$

пропорциональна мнимой части комплексной координаты (5). Соответственно, траектория маятника на фазовой плоскости XV (рис. 2б) с точностью до растяжения вертикальной оси эквивалентна вращению вектора (5) на комплексной плоскости, показанной на рис. 1.

Таким образом переход к комплекснозначному описанию, во-первых, удобен математически: отсутствие необходимости иметь дело с двумя типами функций, т. е. синусом и косинусом в уравнениях (3) и (4), на практике значительно упрощает вычисления. Физику колебаний и волн тем не менее можно сформулировать и в рамках действительных чисел. Более важно то, что комплекснозначная математика полнее отражает сущность описываемых явлений, как видно на вышеприведённом примере. Это свойство ещё более значимо в квантовой механике, которая изначально формализуется посредством алгебры векторов и операторов в комплекснозначных (Гильбертовых) пространствах [12]. В этом случае комплекснозначное исчисление необходимо для описания не только физических, но и мыслительно-поведенческих процессов [7, 13], что и обуславливает интерес к её когнитивной интерпретации.

### 3. Функциональная структура процесса

Несмотря на то, что искомая интерпретация комплексных чисел относится к работе естественного мышления, казалось бы, далёкой от задач механики, её основные черты можно установить на примере пружинного маятника, показанного на рис. 2.

### 3.1. Семантика колебательного процесса

При нулевой начальной фазе  $\phi_0 = 0$  в начальный момент времени  $t = 0$  (точка 3 на рис. 2) определяемый координатой груза (3) размер маятника принимает наибольшее значение с растяжением  $x(0) = A$ . Этот исходный размер уменьшается по гармоническому закону (2), согласно которому пружина стремится к нерастянутому состоянию  $x = 0$  (точка 0,  $\phi = \pi/2$ ), когда сила упругости равна нулю. Пружина, взятая отдельно, осталась бы в этом равновесном положении, однако разогнанный груз продолжает сжимать её в силу своей инерции. При этом пружина занимает пассивную роль, принимая внешний импульс и накапливая его в виде внутренней (потенциальной) энергии.

Импульс груза исчерпывается ( $v = 0$ ) в крайней точке 1 на рис. 2, соответствующей фазе  $\phi = \pi$ . При этом размер системы достигает наименьшего значения при отрицательном растяжении  $x = -A$ . В этот момент наибольшего напряжения пружина переходит из режима приёма в режим отдачи, направляя накопленную энергию для расширения системы путём выталкивания груза. Этот этап продолжается вплоть до точки 2 на фазе  $\phi = 3\pi/2$ , в которой пружина вернулась в недеформированное состояние  $x = 0$  и её внутренняя энергия перешла в энергию движения груза. Подобно противоположной точке 0, это равновесное положение преодолевается благодаря инерции груза, проходящего теперь уже в положительном направлении с наибольшей скоростью  $v = v_{\max}$ . Этот этап продолжается вплоть до остановки груза  $v = 0$ , когда энергия его движения целиком затрачена на расширение системы до наибольшего размера  $x = A$ . В этот момент маятник попадает в исходное состояние 3, завершая цикл колебательного движения.

### 3.2. Универсальная структура процесса

Для нахождения искомой функции это описание необходимо освободить от частностей рассматриваемой механической задачи. Оставшееся содержание представляет собой следующий набор этапов, соответствующих нумерации состояний на рис. 2:

- Этап 0: движение внутрь, сжатие системы, накопление потенциала;
- Этап 1: наименьший размер системы, наибольшее напряжение, переход от сжатия к расширению;
- Этап 2: движение наружу, расширение системы, выделение энергии;
- Этап 3: наибольший размер системы, наименьшее напряжение, переход от расширения к сжатию.

В таком абстрактном виде эта последовательность образует общую структуру процессов, известную как *жизненный цикл* систем различной природы: живых организмов, организаций и социально-экономических систем, проектов, товаров и технологий [14]. Установлено её соответствие с функциями времён года и суток, когда этапы  $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$  соответствуют зиме (ночи), весне (утру), лету (дню)

и осени (вечеру). Эта последовательность представляет собой универсальную логику развития процессов в природе, с необходимостью отражённую в естественно-процессном мышлении [15]. Четырём этапам процесса при этом соответствуют следующие когнитивно-поведенческие функции, отмеченные на рис. 3:

- Этап 0: накопление опыта, восприятие новой информации;
- Этап 1: анализ проблем, постановка целей и планирование будущего;
- Этап 2: действия по осуществлению плана, проведение мероприятий и работ;
- Этап 3: апробация и оценка полученного результата, внедрение в практику.

Эта динамика соответствует кибернетическому циклу управления, в котором субъект (слева, 1) взаимодействует с объектом (справа, 3) посредством прямых (2) и обратных (4) потоков информации (там же). Принципиальную важность при этом имеет цикличность модели, отражающая диалектическое замыкание процесса: в отличие от линейных моделей, в циклической структуре результат направлен не просто куда-то в будущее, а отвечает на возникшую проблему [16].



Рис. 3. Функциональная структура четырёхэтапной модели процесса

Горизонтальная (X) и вертикальная (Y) оси на рис. 3 кодируют размер системы и направленность его динамики в ходе процесса; в семантике Ч. Осгуда [17] эти оси соответствуют ортогональным факторам *силы* и *активности* [15]. Это соответствие отличает представленную модель от схематических изображений жизненных циклов, лишённых количественного выражения. Как и в механической задаче (раздел 2), (фазовая) траектория процесса располагается на фазовой, или *процессной, плоскости*, образованной метрологически обеспеченными величинами. Это свойство представленной структуры вводит процессное моделирование в научное поле [15, 16].

### 3.3. Пример

Рассмотрим описанную структуру на примере процесса стройки дома.

- На этапе 0 происходит нормальная эксплуатация имеющегося жилья, в ходе которой, однако, со временем накапливаются неудобства и напряжения. Когда комплекс этих напряжений и неудобств осознаётся как проблема, требующая решения, например, плохое состояние имеющегося жилья или его несоответствие изменившимся нуждам, процесс переходит в следующую фазу.
- На этапе 1 выявленная проблема – отсутствие удобного жилья – обдумывается. Выявляются её причины и вырабатывается желаемый образ будущего жилья. Разрабатывается план по достижению этой цели (ремонт имеющегося или строительство нового дома), рассчитываются необходимые средства, заключаются договоры и составляются планы и сметы.
- На этапе 2 проводятся намеченные мероприятия, осуществляются запланированные и незапланированные действия по достижению поставленной цели: сбор ресурсов, подготовка участка, подведение коммуникаций, строительные работы, отделка и т. д. Также решаются непредвиденные проблемы и трудности. Это этап наибольшей внешней активности.
- На этапе 3 проводятся проверки, оценка и доведение полученного результата до финального состояния. Дом вводится в эксплуатацию, происходит его внедрение в процессы жизнедеятельности. Последующая эксплуатация соответствует возврату процесса к описанному выше этапу 0.

### 3.4. Прогнозная функция

Знание текущего сезона позволяет предвидеть динамику природной среды, а также связанной с ней деятельности человека. Такое предвидение возможно благодаря знанию структуры сезонного цикла, соответствующей строению процесса на рис. 3 (зима внизу и далее по часовой стрелке). Аналогично знание структуры любого процесса и его текущей фазы делает возможным прогнозирование будущего течения этого процесса.

Как видно из примера о стройке дома, название процесса обычно указывает на его целевой результат – объект, сущность, фактор или событие, на которое направлен процесс. По отношению к этому результату (содержание точки 3 в схеме на рис. 3) этапы процесса несут следующую прогнозную информацию:

- На этапе 3 результат только что достигнут и имеется в наличии. Это состояние можно обозначить как состояние «результат есть». Далее ожидается его обкатка и внедрение в практику.
- На этапе 0 идёт нормальная деятельность на основе только что полученного результата. В отсутствие новых целей (относительно жилья) и соответствующих действий нового результата (нового дома) при этом не ожидается.

- На этапе 1 осознанная проблема обусловлена отсутствием результата. Это состояние «результата нет». В этом состоянии ожидаются действия по решению проблемы.
- На этапе 2 проводимые мероприятия ведут к результату на следующем шаге. Это состояние «результат ожидается», после которого ожидается состояние 3 «результат есть».

Таким образом четырёхэтапная структура процесса

Новость → Цель → Действие → Результат

соответствует последовательности прогнозных состояний

Не ожидается → Нет → Ожидается → Есть.

На практике, разумеется, процесс разворачивается непрерывно как показано на рис. 3. При этом указанные состояния позволяют ориентироваться в этой непрерывности подобно тому, как этапы проектирования, реализации и рефлексии [18] позволяют ориентироваться в жизненном цикле проекта и прогнозировать его течение несмотря на то, что хронологические границы между этими этапами могут быть определены нечётко.

#### 4. Процессная интерпретация комплексных чисел

Независимо от числа этапов ключевым свойством представленной модели процесса является замкнутая кольцевая структура. Для своей математической кодировки эта структура требует соответствующей числовой системы. Простейший вариант такой системы представляют собой именно комплексные числа благодаря кольцевой топологии их фазового параметра, отмеченной в разделе 2. В соответствии со структурой комплексной плоскости (рис. 1) для такого кодирования наиболее удобна описанная в разделе 3 четырёхэтапная модель процесса<sup>1</sup>. Таким образом, искомая интерпретация комплексных чисел определяется наложением модели процесса (рис. 3) на комплексную плоскость (рис. 1). При этом состояние процесса описывается комплексным числом (1), фаза которого соответствует *фазе процесса* в обычном смысле этого выражения. При обычном измерении угла  $\phi$  против часовой стрелки точки 0, 1, 2 и 3 соответствуют значениям  $3\pi/2 = 270^\circ$ ,  $\pi = 180^\circ$ ,  $\pi/2 = 90^\circ$  и 0, так что квадранты комплексной плоскости соответствуют переходам между соседними точками на рис. 4. Согласно тождеству

$$Re^{i\phi} * e^{i\Delta} = Re^{i(\phi+\Delta)}$$

каждый из этих переходов соответствуют домножению комплексного числа (1) на постоянный множитель  $e^{i(-\pi/2)} = -i$ , поворачивающий вектор на рис. 1 на  $90^\circ$  по часовой стрелке.

<sup>1</sup>Разбиение процессного цикла на отдельные этапы является вопросом удобства в конкретной задаче. Наиболее распространено использование от трёх до шести этапов [14, 15].



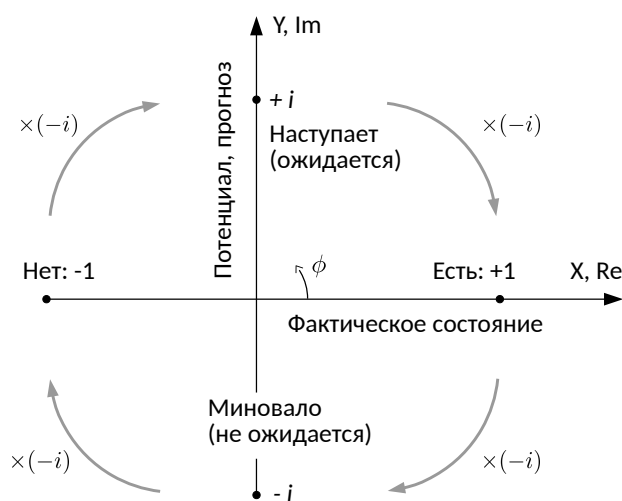


Рис. 4. Процессная интерпретация комплексной плоскости. Серыми стрелками показано направление процессного цикла в согласии с рис. 2 и 3

Согласно прогнозной функции этапов процесса (раздел 3.4) декартовы оси комплексной плоскости получают следующие функции. Горизонтальная, действительная ось  $X$  описывает действительное, т. е. фактическое состояние результата, на который направлен процесс (дом в процессе стройки, пример в разделе 3.3). В крайней левой точке цикла  $\phi = \pi$ ,  $z = -1$  отсутствие этого результата соответствует состоянию «нет». В крайней правой точке цикла  $\phi = 0$ ,  $z = 1$  наличие этого результата соответствует состоянию «есть». Для колебательного процесса на рис. 2 таким результатом является достижение маятником максимального размера.

Вертикальная, мнимая ось  $Y$  описывает мнимое, т. е. потенциальное, возможное состояние результата. В крайней верхней точке  $\phi = \pi/2$ ,  $z = i$  в силу проводимых для этого мероприятий результат *ожидается*. В крайней нижней точке  $\phi = 3\pi/2$ ,  $z = -i$ , напротив, результат уже достигнут на предыдущей фазе процесса и более *не ожидается*. Ожидается, напротив, событие «нет» в точке  $z = -1$ . Абсолютные значения этих координат, следовательно, и модуль соответствующего вектора (1) определяются единицами измерения по осям  $X$  и  $Y$ .

## 5. Использование в когнитивном моделировании

Представленная интерпретация комплексных чисел указывает на их тесную связь с принципами естественного мышления, важнейшей функцией которого является прогнозирование будущего [19, 20]. Такой прогноз (предчувствование, предвидение), будь то завтрашняя погода, загруженность дороги, реакция партнёра на новый проект или собственное самочувствие, необходим психике для управления поведением организма [21]. Для такого управления важно знать последствия событий, а не их описание как таковых; в этой связи представление информации в естественном мышлении имеет не пассивный, отвлечённо-описательный, а активный, конкретно-предсказательный характер [22, 23].

### 5.1. Предсказательное кодирование

Именно такую конкретно-предсказательную функцию выполняет описанное выше комплекснозначное представление. Расположение события в процессной структуре ничего не говорит о его содержании самом по себе, но явно указывает на его причины и следствия, расположенные назад и вперёд по ходу процесса. Эта причинно-следственная функция любого информационного блока *в составе конкретного процесса* кодируется фазовым параметром, как показано на рис. 3 и 4.

Такой способ кодировки позволяет решить ряд проблем, свойственных современным подходам к предсказательному кодированию психической информации на основе сетевых структур, например, так называемых байесовских сетей, строящихся для представления логико-вероятностных связей элементов поведенческой ситуации весами рёбер соответствующего графа [24–26]. Недостатком такого подхода<sup>2</sup> является неопределённость принципов построения сетевой структуры, свойственной для информации различной модальности (зрительная, слуховая и т. д.) и различных типов когнитивно-поведенческой активности. Кроме того, параметры таких сетей интерпретируются не лучше параметров других нейросетевых моделей, что дополнительно ограничивает практическое применение методов этого типа.

Представленная структура, напротив, единообразно описывает пространственно-временные и абстрактно-мыслительные процессы независимо от модальности информационных блоков в их составе; простота этой структуры, свойственная глубинным архетипам психики, обеспечивает её интуитивную интерпретируемость [15]. Предложенное кодирование процессно-прогностической информации комплексными числами наследует эту интерпретируемость, универсальность и простоту. Сложность и гибкость, характерные для естественной психики, при этом достигаются многоуровневым наложением многих процессов, в которых участвует субъект мышления. Таким образом, комплексное число представляет собой естественную и универсальную единицу информации для задач выявления и анализа процессов в данных различной природы [29–32].

### 5.2. Биологический носитель

Естественным носителем представленной модели является колебательная динамика нейронных ансамблей в нервной системе живых организмов [33–37]. Участвующие в этой динамике электрохимические колебания и волны описываются подобно механическому колебанию, рассмотренному в разделе 2. Фаза представляемого процесса при этом кодируется фазой соответствующего колебания или волны [38–41], порождая так называемую волновую логику вероятностных когнитивно-поведенческих закономерностей [28].

Таким образом, мышление живых организмов работает как аналоговый динамический симулятор окружающей среды, процессы которой представляются волновыми возбуждениями соответствующей нервной системы. Эффективность симуляции при этом обусловлена точностью такого представления в сегменте природы, зна-

<sup>2</sup>Помимо ограниченной применимости логики множеств, классической теории вероятности и байесовского вывода для моделирования естественного мышления [27, 28].

чимом для деятельности организма [42]. Возможность такого соответствия обеспечена структурным изоморфизмом (иерархически организованных [43]) колебательных процессов в окружающей среде организма и его когнитивной системе.

Важнейшую роль в этом соответствии играют фазовые параметры комплексных чисел, кодирующие текущее состояние рассматриваемых процессов. Верная оценка фазовых параметров необходима для своевременности принимаемых решений: всему своё время; готовь сани летом и т. д. Ошибка в таких параметрах («сдвиг по фазе») проявляется в неадекватном мышлении и несвоевременных поступках, ведущих к ущербу соответствующей деятельности. В этой связи фазовая синхронизация является одним из главных биологических механизмов естественного мышления [34, 37, 44, 45].

## 6. Заключение

Представленная интерпретация комплексных чисел применима к голографическим, квантово-подобным и другим моделям мышления и принятия решений на основе волновой логики [28]. В последнем случае комплексные величины также кодируют амплитуду и фазу квантово-когнитивных состояний. Предполагается, что соответствующая алгебра комплексных чисел может стать важной частью информационных систем следующего поколения на принципах естественного мышления [46]. Процессная логика комплексных чисел отражает важнейший такой принцип, лежащий в основе субъективно-смыслового и причинно-следственного мышления живых организмов [15].

Помимо интерпретации существующих, представленная модель полезна для создания новых алгоритмов обработки и представления данных, в том числе на основе комплекснозначных нейросетей [47]. В связке с имеющимися моделями когнитивной семантики и семиотики [27] этот подход позволяет сориентировать поиск в наиболее эффективном природоподобном направлении. Такое сопряжение открывает возможности для создания интерпретируемых и информационных систем и вычислительных архитектур на новых логико-математических принципах.

## 7. Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-71-01046 (<https://rscf.ru/project/23-71-01046/>).

## Литература

1. Максимов Н.В., Голицына О.Л. От семантического к когнитивному информационному поиску. Основные положения и модели глубинного семантического поиска // Научно-техническая информация. Серия 2. Информационные процессы и системы. 2022. № 6. С. 1–16.
2. Hagendorff T., Wezel K. 15 challenges for AI: or what AI (currently) can't do // AI Soc. 2020. Vol. 35, No. 2. С. 355–365.

3. Хорошевский В.Ф. Семантические Технологии: Ожидания и тренды // Ostis-2012. 2012. С. 10–12.
4. Колмаков В.Ю. Семантические технологии – основа нового технологического уклада. 2017. URL: <http://www.radnews.ru/сРхРёРер,,СЪРчСЪРхСФРэРчРх-СЪРхСЖР,,Р«РЪР«РҮРчРч-Р«СФР,,Р«РӱРө-Р,,Р«Рӱ/?ysclid=lmhk9ufq8y663916390> (дата обращения: 29.10.2023).
5. Moore D.T. [et al.] Sensemaking for 21st century intelligence // J. Intell. Hist. 2021. Vol. 20, No. 1. С. 45–59.
6. Кузнецов О.П. Голографические модели обработки информации в нейронных сетях // Докл. РАН. 1992. Т. 324, № 3. С. 537–540.
7. Khrennikov A. Yu. Ubiquitous Quantum Structure. From psychology to finance. Heidelberg : Springer, 2010. 216 p.
8. Райков А.Н. Слабый vs сильный искусственный интеллект // Информатизация и связь. 2020. № 1. С. 81–88.
9. Максимов Н.В., Лебедев А.А. О природе и определениях информации: физика и семантика // Научно-Техническая Информация. Серия 2. Информационные Процессы и системы. 2020. № 7. С. 1–12.
10. van der Waerden B.L. From Matrix Mechanics and Wave Mechanics to Unified Quantum Mechanics // Phys. Concept. Nat. 1973. С. 276–293.
11. Smith W.F. Waves and Oscillations A Prelude to Quantum Mechanics. Oxford University Press, 2010.
12. Холево А.С. Математические основы квантовой информатики. Лекционные курсы НОЦ. М : МИАН, 2018. 118 с.
13. Суров И.А., Алоджанц А.П. Модели принятия решений в квантовой когнитивистике. Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2018. 63 с. URL: <http://books.ifmo.ru/book/2187/> (дата обращения: 29.10.2023).
14. Берг Д.Б., Ульянова Е.А., Добряк П.В. Модели жизненного цикла : учебное пособие. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2014. 74 с.
15. Суров И.А. Жизненный цикл: смысловая матрица процессного моделирования // Онтология проектирования. 2022. Т. 12, № 4. С. 430–453.
16. Суров И.А. Процессная онтология и квантование информации // Знания – Онтологии – Теории. Новосибирск, 2023.
17. Osgood C.E. Studies on the generality of affective meaning systems // Am. Psychol. 1962. Vol. 17, No. 1. С. 10–28.
18. Белов М.В., Новиков Д.А. Основы теории комплексной деятельности. Ч. 2. Жизненные циклы комплексной деятельности. Организация и управление как комплексная деятельность // Проблемы управления. 2018. № 4. С. 39–48.
19. Pally R. The predicting brain: Unconscious repetition, conscious reflection and therapeutic change // Int. J. Psychoanal. 2007. Vol. 88, No. 4. С. 861–881.
20. Bubic A., Yves von Cramon D., Schubotz R.I. Prediction, cognition and the brain // Front. Hum. Neurosci. 2010. Vol. 4.
21. Gładziejewski P. Predictive coding and representationalism // Synthese. 2016. Vol. 193, No. 2. С. 559–582.
22. Clark A. Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science // Behav. Brain Sci. 2013. Vol. 36, No. 3. С. 181–204.
23. Clark A. Perceiving as Predicting // Perception and Its Modalities / edited by Stokes D.,

- Matthen M., Biggs S. Oxford University Press, 2014. P. 23–43.
24. Gopnik A., Glymour C. Causal maps and Bayes nets: a cognitive and computational account of theory-formation // *The Cognitive Basis of Science*. Cambridge University Press, 2002. С. 117–132.
  25. Williams D. Predictive coding and thought // *Synthese*. Springer Netherlands. 2020. Vol. 197, No. 4. P. 1749–1775.
  26. Millidge B., Seth A., Buckley C.L. Predictive Coding: a Theoretical and Experimental Review. 2021. P. 1–56.
  27. Суров И.А. Какая разница? Прагматическая формализация смысла // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2023. № 1. С. 78–89.
  28. Суров И.А. Логика множеств и логика волн в когнитивно-поведенческом моделировании // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2024 (в печати).
  29. van der Aalst W. *Data Science in Action // Process Mining*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2016. P. 3–23.
  30. Adamo G. [et al.]. *Business Process Management Forum / edited by Weske M. [and etc.]*. Cham : Springer, 2018. Vol. 329.
  31. Andryushin A. [and etc.] *Outlier Detection in Predictive Analytics for Energy Equipment // Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling*. Studies in Systems, Decision and Control, vol 259 / Edited by Kravets A., Bolshakov A., Shcherbakov M. Cham : Springer, 2020. С. 193–203.
  32. Surov I.A. *Process-Semantic Analysis of Words and Texts // Artificial Intelligence in Models, Methods and Applications / edited by Dolinina O. [and etc.]*. Cham : Springer, 2023. P. 247–260.
  33. Hutcheon B., Yarom Y. Resonance, oscillation and the intrinsic frequency preferences of neurons // *Trends Neurosci*. 2000. Vol. 23, No. 5. P. 216–222.
  34. Glass L. Synchronization and rhythmic processes in physiology // *Nature*. 2001. Vol. 410, No. 6825. P. 277–284.
  35. VanRullen R., Dubois J. The Psychophysics of Brain Rhythms // *Front. Psychol*. 2011. No. 2. P. 1–10.
  36. Arnal L.H., Giraud A.L. Cortical oscillations and sensory predictions // *Trends Cogn. Sci*. 2012. Vol. 16, No. 7. P. 390–398.
  37. Fries P. Rhythms for Cognition: Communication through Coherence // *Neuron*. 2015. Vol. 88, No. 1. P. 220–235.
  38. Niebur E., Koch C., Rosin C. An oscillation-based model for the neuronal basis of attention // *Vision Res*. 1993. Vol. 33, No. 18. P. 2789–2802.
  39. Tiesinga P.H., Sejnowski T.J. Mechanisms for phase shifting in cortical networks and their role in communication through coherence // *Front. Hum. Neurosci*. 2010. Vol. 4. P. 1–14.
  40. Neuling T. [and etc.] Good vibrations: Oscillatory phase shapes perception // *Neuroimage*. 2012. Vol. 63, No. 2. P. 771–778.
  41. Ten Oever S. и др. Phase-Coded Oscillatory Ordering Promotes the Separation of Closely Matched Representations to Optimize Perceptual Discrimination // *iScience*. 2020. Vol. 23, No. 7. P. 101282.
  42. Barsalou L.W. Simulation, situated conceptualization, and prediction // *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci*. 2009. Vol. 364, No. 1521. P. 1281–1289.
  43. Markov N.T., Kennedy H. The importance of being hierarchical // *Curr. Opin. Neurobiol*. 2013.

- Vol. 23, No. 2. P. 187–194.
44. Varela F. и др. The brainweb: Phase synchronization and large-scale integration // Nat. Rev. Neurosci. 2001. Vol. 2, No. 4. P. 229–239.
  45. Wright J.J., Bourke P.D. The growth of cognition: Free energy minimization and the embryogenesis of cortical computation // Phys. Life Rev. 2021. Vol. 36. P. 83–99.
  46. Widdows D., Kitto K., Cohen T. Quantum Mathematics in Artificial Intelligence // J. Artif. Intell. Res. 2021. Vol. 72. P. 1307–1341.
  47. Complex-Valued Neural Networks. Theories and Applications / edited by Hirose A. World Scientific, 2003.

### **PROCESS SEMANTICS OF COMPLEX NUMBERS**

**I.A. Surov**

Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Senior Scientist Researcher,  
e-mail: ilya.a.surov@itmo.ru

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** Perspective approaches to imitation of natural thinking build on wave- and quantum-like models, overcoming the limitations of Boolean logic and classical probability calculus. Further development of these methods requires an explanation of the reasons for these advantages. This paper shows that such a reason is the affinity of fundamental principles of natural cognition to the algebra of complex numbers. The vector structure of these numbers, in particular, matches the universal cognitive model of processes in nature. First, different phases of the complex number correspond to the phases "novelty", "goal", "action", and "result" of the life cycle of the considered activity. Real and imaginary axes of the complex plane then describe the factual and potential dimensions of the process's result. Simplicity and universality allow this model to avoid the major difficulties of modern approaches to predictive coding of cognitive information. These features open ways to algorithmic imitation of process thinking and the development of nature-like computational systems.

**Keywords:** complex numbers, semantics, process, predictive coding, prognostic modeling.

*Дата поступления в редакцию: 03.11.2023*