

СПОСОБ КОНТЕКСТНОЙ ОЦЕНКИ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ С НЕОДНОРОДНЫМИ НАБОРАМИ СВОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА БИТОВОЙ ФАЗИФИКАЦИИ НЕЧЕТКИХ ЗНАЧЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ ПЛЕМЕННОЙ ЦЕННОСТИ ЖИВОТНЫХ

А.В. СТУКАЛИН, О.А. МОТОРИН

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева»,
г. Москва

Ключевые слова и фразы: племенная ценность; битовая фазификация; нечеткие множества; селекция; животноводство; искусственный интеллект; анализ данных; математическое моделирование.

Аннотация: Целью исследования является проверка гипотезы применимости предложенного нового метода обработки нечетких данных методом битовой фазификации для оценки объектов и систем с неоднородными наборами свойств. Предложенный новый метод битовой фазификации (*Fuzzy Bit Encoding*) позволяет преобразовывать нечеткие множества в бинарное представление. Этот подход обеспечивает компактность хранения информации, удобство математического анализа и возможность быстрого сравнения фазифицированных признаков. Для практического применения метода разработан индекс *SFI* (*Stukalin Fuzzy Index*), основанный на анализе нечетких битовых векторов (*Fuzzy Bit Vector*) и нечетких битовых слотов (*Fuzzy Bit Slot*).

На примере оценки племенной ценности животных был апробирован подход. Индекс *SFI* позволяет учитывать сложные взаимосвязи между признаками животных, обеспечивая более точную и адаптивную оценку их племенной ценности. Предложенный подход открывает новые перспективы в применении методов искусственного интеллекта для анализа биологических данных, а также может быть использован в других областях, связанных с обработкой нечетких множеств.

Введение

Оценка племенной ценности животных является важной задачей в современном животноводстве. Правильная стратегия в отборе племенных особей позволяет повысить продуктивность стада, улучшить генетическое здоровье популяции, что ведет к повышению экономической эффективности хозяйств. Однако традиционные методы оценки племенной ценности ограничены строгими статистическими подходами, которые не всегда учитывают сложность и вариативность фенотипических характеристик.

В современном животноводстве широко применяются индексы *TPI* (*Total Performance Index*) и *NMS* (*Net Merit Dollars*), основанные на анализе родословных данных, фенотипических признаков и экономической значимости характеристик. Эти индексы позволяют проводить сравнительный анализ животных внутри популяции, однако они имеют ряд недостатков, таких как фиксированные весовые коэффициенты, строгие пороговые значения и отсутствие гибкости в интерпретации характеристик животных.

В данной работе вводится новый метод анализа нечетких данных – метод битовой фа-

зификации (*Fuzzy Bit Encoding*). Этот метод позволяет преобразовывать нечеткие множества в бинарное представление, обеспечивая компактность хранения, удобство математического анализа и возможность быстрого сравнения фазифицированных признаков.

Одновременно предлагается практическое применение метода битовой фазификации для оценки племенной ценности животных. В основе данного подхода лежит созданный автором индекс *SFI* (*Stukalin Fuzzy Index*), основанный на методе битовой фазификации. Эти данные формируют нечеткие битовые векторы (*Fuzzy Bit Vector*)¹, состоящие из нечетких битовых слотов (*Fuzzy Bit Slot*)². Таким образом, предложенный метод битовой фазификации является не только инструментом для анализа племенной ценности животных, но и универсальным способом обработки нечетких данных в бинарной форме.

Применение нечетких битовых слотов и нечеткого битового вектора позволяет:

- гибко анализировать фенотипические характеристики животных без строгих пороговых значений;
- компактно представлять информацию о признаках с возможностью эффективного хранения и передачи данных;
- упрощать процесс сравнения животных за счет битового кодирования, где каждый нечеткий битовый вектор можно интерпретировать как числовое значение;
- адаптировать индекс к потребностям конкретного хозяйства, племени, региона, породы или даже страны, позволяя учитывать локальные особенности селекции и экономической значимости характеристик.

В данной статье также вводятся новые понятия для теории нечетких множеств, такие как Нечеткий битовый слот (*Fuzzified Bit Slot*) и Нечеткий битовый вектор (*Fuzzy Bit Vector*), которые формализуют процесс бинарного кодиро-

¹ Нечеткий битовый вектор (*Fuzzy Bit Vector*) – это битовое представление фазифицированных данных, в частности фазифицированных фенотипических признаков. Он представляет собой упорядоченный набор нечетких битовых слотов, в котором позиция слота отражает значимость (вес) соответствующего признака. Свойства данного профиля детально рассмотрены в статье.

² Нечеткий битовый слот (*Fuzzy Bit Slot*) – это бинарное представление одного нечетко определенного признака в составе нечеткого битового вектора. Длина слота определяется мощностью (размерностью) нечеткого множества, что определяет число возможных состояний признака.

вания фазифицированных данных. Эти понятия открывают новые возможности в обработке нечетких данных, упрощая их анализ и сравнение с использованием битовых операций.

Предложенная методика расчета индекса позволяет более точно и адаптивно оценивать племенную ценность животного, обеспечивая удобную интерпретацию результатов и их применение в селекционных программах³.

Дополнительным преимуществом является возможность применения данного метода не только в оценке племенной ценности животных, но и в других областях анализа данных, где требуется работа с нечеткими множествами и бинарным кодированием.

Нечеткий битовый слот и нечеткие битовые вектора

Для дальнейшего описания метода вводятся новые для теории нечетких множеств понятия: нечеткий битовый слот (*Fuzzy Bit Slot*) и нечеткий битовый вектор (*Fuzzy Bit Vector*).

Нечеткий битовый вектор (далее – битовый вектор) – это битовое представление фазифицированных данных, в частности фазифицированных фенотипических признаков. Он представляет собой упорядоченный набор нечетких битовых слотов, в котором позиция слота отражает значимость (вес) соответствующего признака [5].

Нечеткий битовый слот (далее – битовый слот) – это бинарное представление одного нечетко определенного признака в составе битового вектора. Длина слота определяется мощностью (размерностью) нечеткого множества, что определяет число возможных состояний признака.

Свойства нечеткого битового вектора и нечетких битовых слотов

Упорядоченность по важности признаков

Каждый нечеткий битовый слот представляет нечеткое значение из нечеткого множества, а его вес определяется установленными старшими битами – чем старше биты, тем более значимый признак они кодируют.

³ Селекционная программа – это комплекс научно обоснованных мероприятий, направленных на улучшение генетических характеристик животных, повышение продуктивности и обеспечение устойчивого разведения популяции в соответствии с целями конкретного хозяйства, региона или страны.

Внутри нечеткого битового вектора каждый слот также имеет позиционный вес, зависящий от его расположения в векторе. Чем старше слот (расположен левее), тем более важный признак он содержит.

Это свойство позволяет сравнивать векторы не только по конкретным значениям, но и по их структуре приоритетов, обеспечивая более точную и гибкую интерпретацию данных.

Нечеткий битовый профиль позволяет эффективно находить и сравнивать интересующие группы признаков в различном сочетании, например, с использованием битовых масок.

Алгебраическая структура профиля

Профиль можно описать как элемент булева полукольца, где операции объединения (дизъюнкции) и пересечения (конъюнкции) позволяют работать со множествами фазифицированных данных [1].

Это делает систему математически строго формализуемой, а сам индекс – легко адаптируемым к различным алфавитам и системам кодирования.

Битовый вектор можно конвертировать в любой алфавит, включая латиницу, кириллицу, Base32, Base58, а также числовые и гибридные кодировки.

Это делает систему универсальной для хранения, передачи и анализа данных.

Для SFI предлагается использовать Base12, основанный на буквах латинского алфавита, имеющих графические аналоги в кириллице (АВСЕНКМОРТХУ).

Метод битовой фазификации

Метод битовой фазификации (*Fuzzy Bit Encoding*) представляет собой способ бинарного кодирования нечетких данных, в котором фазифицированные значения признаков переводятся в нечеткие битовые векторы, состоящие из нечетких битовых слотов. Такой подход позволяет работать с нечеткими множествами в бинарной форме, обеспечивая их компактное представление, эффективное сравнение и анализ.

В отличие от классического подхода к фазификации, где каждому элементу нечеткого множества сопоставляется степень принадлежности в интервале $[0; 1]$, в методе битовой фазификации после классической фазификации используется структурированное бинарное кодирование нечетких значений. Это позволяет не

только учитывать вариативность характеристик, но и делать данные удобными для математического анализа с применением булевых операций.

Фазификация – это процесс преобразования четких значений в нечеткие, при котором числовые данные интерпретируются как элементы нечеткого множества. В отличие от традиционных дискретных классификаций, фазификация позволяет учитывать степень принадлежности объекта к нескольким категориям одновременно [2].

Для описания степени принадлежности элементов к нечетким множествам используются функции принадлежности. Функция принадлежности $f(A, x)$ принимает значения в интервале $[0; 1]$, где:

- 0 – означает, что элемент x не принадлежит множеству A ;
- 1 – означает полную принадлежность x множеству A ;
- все иные значения между 0 и 1 отражают степень частичной принадлежности элемента x множеству A .

Формальная постановка задачи

Пусть дано нечеткое множество F , состоящее из конечного числа элементов $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, где каждый элемент A_i имеет нечеткое значение, соответствующее фазифицированному признаку. Также для работы алгоритма требуется задание приоритета для каждого из элементов множества F , определяющего его значимость относительно других элементов.

Метод битовой фазификации включает следующие шаги.

1. *Фазификация данных.*
 - Определение нечетких множеств F_1, F_2, \dots, F_k , к которым могут принадлежать элементы исходных данных.
 - Выбор функции принадлежности $f(A, x)$ для каждого множества.
 - Вычисление степени принадлежности $f(A, x)$ для каждого значения x на основе выбранной функции.
 - Формирование фазифицированного представления, где каждый элемент получает принадлежность к нескольким множествам с разной степенью уверенности.
2. *Кодирование нечетких множеств.*
 - Каждому нечеткому множеству F_i ставится в соответствие уникальный бинарный код

длины m .

– Битовое кодирование признаков – каждому значению A_i из множества F сопоставляется бинарный код длины m , где m определяется мощностью множества нечетких значений.

3. *Формирование нечетких битовых слотов.*

– Каждый фазифицированный элемент представляется в виде нечеткого битового слота, где заданное количество битов определяет размер памяти для хранения бинарного кода нечеткого значения.

– Опционально: в ситуациях, когда нечеткие значения имеют более высокий приоритет в рамках контекста, вводится дополнительное ранжирование значений внутри нечеткого множества. Иногда средние значения являются более важными, чем пограничные значения нечеткого множества.

– В рамках нечеткого битового вектора битовые слоты упорядочиваются в соответствии с их приоритетами: признаки с более высокой значимостью располагаются в старших битах, а менее значимые – в младших. Это обеспечивает возможность сравнения и ранжирования объектов на основе их характеристик.

4. *Кодирование нечеткого битового вектора с использованием Base-форматов.*

– Для уменьшения размера хранения данных и повышения удобства передачи нечеткие битовые векторы могут быть закодированы с использованием систем Base-кодирования (например, Base32 или Base58). Эти системы позволяют представлять двоичные данные в удобном символьном формате, уменьшая их размер за счет более высокой плотности кодирования.

– Base-кодирование используется для эффективного хранения длинных битовых векторов, их удобной сериализации и передачи в цифровых системах, где важно минимизировать объем данных.

– Преобразование битового вектора в Base-формат включает разбиение исходных битов на группы фиксированной длины и их последующую замену символами из алфавита кодировки.

– Base-кодированные векторы сохраняют возможность булевых операций, так как при декодировании обратно в бинарный формат вся структура нечетких битовых векторов восстанавливается без потерь.

В результате применения метода битовой фазификации наборы данных, содержащие не-

четкие множества представляются в бинарной форме, сохраняя информацию о значимости признаков и обеспечивая возможность эффективного анализа и обработки данных.

Существующие методики расчета традиционных индексов с примерами

TPI (Total Performance Index)

Применяется в молочном скотоводстве и основывается на взвешенной сумме различных характеристик животного.

Расчет индекса *TPI* (*Total Performance Index*):

$$TPI = (0,46 \times PTA_{\text{молоко}}) + (0,20 \times PTA_{\text{жир}}) + (0,14 \times PTA_{\text{белок}}) + (0,10 \times \text{долговечность}) + (0,10 \times \text{здоровье вымени}),$$

где *PTA* (*Predicted Transmitting Ability*) – прогнозируемая передача признака, рассчитываемая на основе родословных данных; $PTA_{\text{молоко}}$ (кг) – прогнозируемый удой молока; $PTA_{\text{жир}}$ (%) жирности) – прогнозируемое содержание жира в молоке; $PTA_{\text{белок}}$ (%) белка) – прогнозируемое содержание белка в молоке; долговечность (месяцы) – продолжительность продуктивной жизни коровы; здоровье вымени (баллы) – показатель устойчивости к маститу.

Пример расчета.

Предположим, что у коровы значения $PTA_{\text{молоко}} = 1000$ кг, $PTA_{\text{жир}} = 3,8$ %, $PTA_{\text{белок}} = 3,2$ %, долговечность = 36 месяцев, здоровье вымени = 7 баллов.

Тогда *TPI* будет рассчитываться следующим образом:

$$TPI = (0,46 \times 1000 \text{ кг}) + (0,20 \times 3,8 \%) + (0,14 \times 3,2) + (0,10 \times 36) + (0,10 \times 7) = 465,508.$$

Таким образом, $TPI \approx 465$, что указывает на среднюю племенную ценность данной коровы.

NMS (Net Merit Dollars)

Экономический индекс, выраженный в долларах, учитывает ожидаемый доход от животного за его продуктивную жизнь. Рассчитывается Советом по селекции молочных пород КРС в США (*CDCB*). Прогнозирует чистую прибыль, получаемую от усредненной по определенным показателям коровы на протяжении ее жизни.

Формула расчета экономического индекса *NMS* (*Net Merit Dollars*):

$$NM\$ = (0,40 \times \text{доход от молока}) + (0,20 \times \text{фертильность}) + (0,15 \times \text{здоровье}) + (0,15 \times \text{продуктивное долголетие}) + (0,10 \times \text{устойчивость к маститу}),$$

где доход от молока (*USD*/год) – средний годовой доход от реализации молока; фертильность (баллы) – способность животного к размножению; здоровье (баллы) – общий показатель устойчивости к заболеваниям; продуктивное долголетие (годы) – среднее число лет продуктивного использования коровы; устойчивость к маститу (баллы) – параметр, оценивающий вероятность возникновения мастита.

Пример расчета.

Допустим, доход от молока = 3000 *USD*, фертильность = 5, здоровье = 7, продуктивное долголетие = 5 лет, устойчивость к маститу = 8.

Тогда *NM\$* будет рассчитан следующим образом:

$$NM\$ = (0,40 \times 3\,000) + (0,20 \times 5) + (0,15 \times 7) + (0,15 \times 5) + (0,10 \times 8) = 1\,203,6.$$

Таким образом, *NM\$* ≈ 1 204 *USD*, что говорит о высокой экономической ценности животного.

В мясном скотоводстве адаптируется для оценки прироста массы и эффективности кормления.

Основной недостаток – зависимость от рыночных условий, влияющих на экономическую значимость параметров.

Обе методики используют жестко заданные веса для оценки каждого признака, что снижает их адаптивность и точность в изменяющихся условиях. Это и является одной из ключевых проблем традиционных индексов.

Применение метода битовой фазификации для формирования SFI

В ходе исследования автор выявил, что метод битовой фазификации эффективно решает задачу создания племенного индекса животных, обеспечивая более гибкую и адаптивную систему оценки по сравнению с традиционными методами, краткая суть которых представлена выше. В отличие от строгих пороговых значений, используемых в классических индексах, предложенный подход позволяет учитывать вариативность фенотипических признаков и адаптировать систему селекции под специфические

условия хозяйства, породы или региона.

Одним из ключевых преимуществ метода является его способность работать с фазифицированными данными, что устраняет необходимость в точных значениях фенотипических характеристик. В традиционных индексах каждое животное оценивается на основе фиксированных количественных показателей, что не всегда отражает реальную биологическую сложность. Например, разница между удоями 8000 и 8100 кг имеет минимальное значение с точки зрения племенной ценности, однако традиционные системы могут воспринимать ее как существенную. Метод битовой фазификации позволяет объединять животных с похожими характеристиками в нечеткие множества, что дает возможность более объективно учитывать их селекционный потенциал.

Дополнительным преимуществом является возможность динамического расширения нечетких множеств. Для каждого фенотипического признака можно задать нефиксированное количество уровней, что позволяет гибко адаптировать модель под конкретные задачи. Например, если стандартное разбиение по удою включает три категории (низкий, средний, высокий), то при необходимости можно добавить промежуточные уровни (очень низкий, выше среднего и т.д.), увеличивая точность оценки без усложнения математической модели.

Предлагаемый метод обеспечивает не только компактное бинарное представление племенной ценности животного, но и высокую адаптивность к изменениям в селекционной программе. Кодирование фенотипических признаков в виде нечетких битовых векторов делает процесс сравнения и анализа более удобным, а использование *Base*-кодирования позволяет эффективно хранить и передавать полученные индексы. Это делает метод битовой фазификации перспективным инструментом для автоматизированных селекционных систем и цифрового мониторинга племенной ценности животных.

Формирование перечня фенотипических признаков

Для построения племенного индекса животного на основе метода битовой фазификации необходимо предварительно определить перечень фенотипических признаков с учетом половой принадлежности животного. Каждому признаку присваивается приоритет, который определяет его значимость при формировании

Таблица 1. Примеры фенотипических признаков КРС

Признак	Пол	Приоритет	Нечеткое множество	Функция принадлежности	Min	Max	Единицы измерения
Удой за 305 дней лактации	Корова	10	{Низкий, Средний, Высокий}	Треугольная	5000	15000	л
Живая масса	Бык, Корова	9	{Легкий, Средний, Тяжелый}	Гауссовая	500	1400	кг
Скорость роста	Бык, Корова	8	{Медленный, Средний, Быстрый}	Сигмоидальная	0,8	2,5	кг
Содержание белка в молоке	Корова	8	{Низкое, Среднее, Высокое}	Трапецевидная	2,8	4,0	%
Темперамент	Бык, Корова	5	{Спокойный, Средний, Возбудимый}	Гауссовская	1	5	балл

нечеткого битового вектора. Более важные признаки занимают старшие биты в векторе, обеспечивая приоритетность их учета при сравнении особей [3].

Определение нечетких множеств и функций принадлежности

Каждому фенотипическому признаку сопоставляется функция принадлежности и нечеткое множество значений, позволяющее оценивать его в рамках нечеткой логики. Это позволяет учитывать плавные переходы между категориями и обеспечивать более точную селекцию [4].

Функции принадлежности обладают различными свойствами, которые определяют их применение в зависимости от особенностей фенотипического признака. Они могут быть подобраны опытным путем, в зависимости от требований, предъявляемых к оценке признака. Рассмотрим основные типы функций принадлежности и их свойства.

– *Треугольная функция принадлежности* применяется, когда необходимо выделить основную зону значений, в пределах которой признак проявляется наиболее выраженно. Используется, например, для оценки удоя молочных коров, где есть четко выраженный оптимальный диапазон продуктивности.

– *Трапецевидная функция принадлежности* подходит для гибридных категорий, где существует диапазон значений с максимальной

принадлежностью. Применяется для оценки жирности молока, когда допустим широкий диапазон значений без резких границ.

– *Гауссовская функция принадлежности* применяется для плавных переходов между значениями, особенно если фенотипический признак изменяется постепенно. Например, может быть использована для оценки темперамента животных, где степень нервозности не имеет резких порогов.

– *Сигмоидальная функция принадлежности* используется, когда необходимо учитывать пороговый эффект, при котором определенное значение резко повышает вероятность принадлежности. Подходит для оценки скорости роста животных, так как после определенного порога прирост массы ускоряется.

– *Z-образная и S-образная функции принадлежности* применяются для асимметричных характеристик, например, в селекции мясных пород, где живая масса быков может иметь нелинейную зависимость от возраста.

Выбор функции принадлежности для каждого признака позволяет настраивать алгоритм селекции в зависимости от условий хозяйства и целей селекционной программы. Таким образом, метод битовой фазификации обеспечивает адаптивность и точность при анализе племенной ценности животных, позволяя учитывать реальные биологические и продуктивные особенности каждой особи.

Примеры основных фенотипических признаков

В табл. 1 приведены примеры пяти ключевых фенотипических признаков, используемых при формировании *SFI*. В таблице представлены название признака, пол животного, к которому признак применим, приоритет (чем больше, тем выше), множество в виде *json* массива, тип функции принадлежности, минимальное и максимальное значения, единица измерения.

Преобразование фенотипических данных в нечеткий битовый индекс

После определения нечетких множеств и функций принадлежности фенотипические данные каждого животного фазифицируются и преобразуются в бинарный вид. Этот процесс включает несколько этапов.

1. Фазификация признаков.

• Каждое числовое значение сопоставляется нечеткому множеству с определенной степенью принадлежности.

• Например, корова с удоем 8000 кг будет отнесена к значению «Средний» в множестве значений этого показателя в соответствии с функцией принадлежности этого показателя.

• Аналогично, животное с живой массой 700 кг попадает в категорию «Средний» по показателю живой массы.

• Для показателей скорости роста 1,5 кг/день, содержания белка 3,8 % и темперамента (2 балла) также определяется принадлежность к категории «Средний».

2. Кодирование нечетких множеств в битовые слоты.

• Каждому значению из нечеткого множества присваивается бинарный код (например, «Низкий» = 00, «Средний» = 01, «Высокий» = 10).

• Таким образом, после фазификации удой 8000 кг кодируется как 01.

• Остальные признаки животного также получают код 01, поскольку они относятся к категории «Средний».

3. Упаковка индекса.

• Для учета типа животного добавляется 2-битное кодирование, определяющее категорию: 00 – Молочная порода, Корова; 01 – Молочная порода, Бык; 10 – Мясная порода, Корова; 11 – Мясная порода, Бык.

• Полученный код помещается в старший слот битового вектора перед кодированием признаков.

4. Формирование нечеткого битового вектора.

• Бинарные коды всех признаков объединяются в единый нечеткий битовый вектор, расположенный в порядке значимости признаков.

• Например, для молочной коровы битовый вектор примет вид «0001010101».

5. Преобразование битового вектора в компактный индекс *SFI*.

• Бинарный вектор кодируется с использованием *Base*-алфавита (*ABCEHKMORTXY*) для уменьшения его размера и упрощения хранения.

• В результате кодирования битового вектора «0001010101» итоговый племенной индекс животного (*SFI*) принимает вид «AKXA».

Пример профиля животного

• Тип: Молочная порода, Корова → 00.

• Удой за 305 дней: 8000 кг → «Средний» 01.

• Живая масса: 700 кг → «Средний» 01.

• Скорость роста: 1,5 кг/день → «Средний» 01.

• Содержание белка в молоке: 3,8 % → «Среднее» 01.

• Темперамент: 2 балла → «Средний» 01.

Объединяя все эти признаки в битовый профиль «0001010101» и кодируя в *Base*-алфавит, мы получаем окончательный племенной индекс *SFI*: AKXA. Этот индекс легко интерпретируется, компактен и может быть использован для эффективного сравнения племенных животных.

Упаковка индекса

Для удобства хранения и использования племенной ценности животного нечеткий битовый вектор может быть закодирован в *Base*-алфавит для сокращения его длины.

Представим преобразование битового вектора в *Base*-формат.

• Биты группируются и переводятся в систему кодирования, например, *Base32* или *Base58*.

• Для упрощения восприятия индекс может быть представлен символами алфавита *ABCEHKMORTXY*, исключая визуально схожие символы.

Таблица 2. Критерии сравнения методов оценки племенной ценности животных

Критерий	<i>TPI</i>	<i>NMS</i>	<i>SFI</i>	Пояснение
Гибкость в учете признаков	Ограниченная, фиксированные весовые коэффициенты	Ограниченная, фиксированные весовые коэффициенты	Высокая, возможность адаптации под конкретные условия хозяйства	Традиционные индексы используют жесткие весовые коэффициенты, что затрудняет адаптацию под конкретные задачи селекции. В <i>SFI</i> можно изменять приоритеты признаков и адаптировать индекс под нужды хозяйства
Учет нечеткости данных	Не учитывается	Не учитывается	Полный учет через нечеткие множества	Нечеткие множества позволяют учесть, что разница между животными может быть не критичной, но все же значимой. Это особенно полезно для плавных переходов между уровнями продуктивности
Компактность представления данных	Требует значительных объемов для хранения	Требует значительных объемов для хранения	Компактное бинарное кодирование	В <i>TPI</i> и <i>NMS</i> каждое животное описывается большим количеством параметров, что затрудняет хранение и передачу данных. В <i>SFI</i> индекс кодируется в виде короткой символической строки
Адаптивность к изменениям	Низкая, требует пересмотра весов и параметров	Низкая, требует пересмотра весов и параметров	Высокая, динамическое обновление без значительных изменений структуры	В <i>TPI</i> и <i>NMS</i> изменение метода оценки требует пересчета всех коэффициентов. В <i>SFI</i> достаточно изменить функции принадлежности или приоритет признаков, что делает метод более гибким
Простота сравнения животных	Сложное, требует анализа множества параметров	Сложное, требует анализа множества параметров	Простое, через сравнение бинарных кодов	Вместо анализа множества числовых характеристик достаточно сравнить два бинарных кода или их символическое представление. Племенная ценность животных в массиве по индексу <i>SFI</i> сортируется в нужном порядке и в разрезе пола и породы. Длина индекса может быть произвольного размера в рамках одного вида
Учет локальных особенностей	Ограниченный	Ограниченный	Полный, возможность настройки под региональные и хозяйственные условия	Климат, кормовая база и экономические факторы могут сильно влиять на значимость признаков. В <i>SFI</i> можно адаптировать индекс к конкретным условиям. Значимость признаков в индексе – мощный селекционный инструмент для достижения целей конкретного хозяйства или племени
Зависимость от точности данных	Высокая (малейшие изменения числовых параметров могут существенно повлиять на оценку)	Высокая (малейшие изменения числовых параметров могут существенно повлиять на оценку)	Низкая (<i>SFI</i> использует диапазоны и нечеткие множества, нивелируя погрешности)	В традиционных индексах даже небольшие различия (например, удои 8000 и 8050 кг) могут повлиять на итоговый рейтинг. В <i>SFI</i> используются нечеткие множества, что делает систему устойчивой к небольшим колебаниям данных

Формирование конечного символического индекса:

- Например, если нечеткий битовый вектор 01010101101100 при кодировании *Base-alfавитом* дает *XKMA*, то итоговый племенной индекс животного записывается как *SFI: XKMA*.

Примеры возможного использования метода в иных сферах

Метод битовой фазификации позволяет оценивать не только племенную ценность животных, но и применять его в других областях,

где необходимо ранжирование объектов с нечеткими признаками. Рассмотрим три потенциальные области применения.

1. Индекс оценки профиля знаний ученика (*SFI-Knowledge*).

2. Индекс оценки сотрудника (*SFI-Employee*).

3. Индекс цифровой зрелости (*SFI-Digital*).

Каждый индекс будет строиться на основе фазифицированных признаков, сгруппированных в нечеткие битовые слоты.

Индекс оценки профиля знаний обучающегося (*SFI-Knowledge*)

SFI-Knowledge позволяет оценивать уровень подготовки обучающегося по различным дисциплинам, выявлять пробелы в знаниях и строить индивидуальные образовательные траектории.

Индекс оценки сотрудника (*SFI-Employee*)

SFI-Employee позволяет проводить ранжирование сотрудников, учитывать мягкие (*soft*) и твердые (*hard*) навыки, прогнозировать продуктивность и соответствие корпоративным требованиям.

Индекс цифровой зрелости предприятия/региона (*SFI-Digital*)

SFI-Digital оценивает уровень цифровизации компаний и регионов, помогая анализировать эффективность цифровых стратегий.

Заключение

Метод битовой фазификации представляет собой универсальный и гибкий подход к обработке нечетких данных, позволяющий преобразовывать их в бинарное представление для удобства хранения и математического анализа.

В его основе лежит формирование нечетких битовых векторов (*Fuzzy Bit Vector*) и слотов (*Fuzzy Bit Slot*), которые могут быть статично заданными либо вычисляться динамически на основе исходных выборок. Для крупных массивов данных возможно матричное представление наборов векторов и их усечений (под заданные перечни свойств/факторов) с последующим разложением для выявления характерных признаков генеральных совокупностей и построения «генерального» индекса (*SFI*) для отрасли или целого комплекса.

Сочетание нечеткой логики и бинарного кодирования, заложенное в методе, открывает широкие перспективы для использования его во множестве сфер – от анализа социальных факторов и медицинской диагностики до образовательных систем и *HR*-аналитики. Адаптивность и компактность представления данных позволяют эффективно выявлять закономерности, задавать индивидуализированные приоритеты признаков и при необходимости расширять модель под новые задачи.

Применение индекса *SFI* в животноводстве для оценки племенной ценности животных дает возможность учитывать вариативность фенотипических признаков без жестких пороговых ограничений, а также упрощает хранение и обработку больших объемов информации. В сравнении с бонитировкой, зависящей от субъективного фактора, и геномной оценкой, требующей дорогого лабораторного оснащения, бинарный индекс *SFI* выступает альтернативным инструментом, позволяющим снизить потери информации и адаптировать систему под конкретные условия (вид, порода, регион и пр.) без изменения фундаментальных принципов метода.

Литература

1. Воронов, М.В. Системы искусственного интеллекта : учебник и практикум для вузов; 2-е изд., перераб. и доп. / М.В. Воронов, В.И. Пименов, И.А. Небаев. – М. : Юрайт, 2025. – 268 с.
2. Осокин, А.Н. Теория информации : учебник для вузов / А.Н. Осокин, А.Н. Мальчуков. – М. : Юрайт, 2025. – 208 с.
3. Системы поддержки принятия решений : учебник и практикум для вузов / под ред. В.Г. Халина, Г.В. Черновой. – М. : Юрайт, 2025. – 501 с.
4. Стукалин, А.В. Целесообразность и существующий опыт использования нечетких множеств и алгоритмов их анализа в агропромышленном комплексе / А.В. Стукалин // Управление рисками в АПК. – 2023. – № 3(49). – С. 78–88.
5. Эдер, А.В. Информационные технологии как драйвер цифрового развития экономики АПК РФ / А.В. Эдер, О.В. Иванов // Пищевая промышленность. – 2020. – № 3. – С. 51–53.

References

1. Voronov, M.V. Sistemy iskusstvennogo intellekta : uchebnik i praktikum dlia vuzov; 2-e izd., pererab. i dop. / M.V. Voronov, V.I. Pimenov, I.A. Nebaev. – M. : Iurait, 2025. – 268 s.
 2. Osokin, A.N. Teoriia informatcii : uchebnik dlia vuzov / A.N. Osokin, A.N. Malchukov. – M. : Iurait, 2025. – 208 s.
 3. Sistemy podderzhki priniatiia reshenii : uchebnik i praktikum dlia vuzov / pod red. V.G. Khalina, G.V. Chernovoi. – M. : Iurait, 2025. – 501 s.
 4. Stukalin, A.V. Tcelesoobraznost i sushchestvuiushchii opyt ispolzovaniia nechetkikh mnozhestv i algoritmov ikh analiza v agropromyshlennom komplekse / A.V. Stukalin // Upravlenie riskami v APK. – 2023. – № 3(49). – S. 78–88.
 5. Eder, A.V. Informatcionnye tekhnologii kak draiver tcifrovogo razvitiia ekonomiki APK RF / A.V. Eder, O.V. Ivanov // Pishchevaia promyshlennost. – 2020. – № 3. – S. 51–53.
-

© А.В. Стукалин, О.А. Моторин, 2025