

УДК 004.891+ 007.52 + 004.896 + 681.518 + 65.011.56 DOI 10.24412/2413-7383-27-42

Голобоков А.М.¹, Коханов А.А.¹, Кац И.Д.¹, Мутина Е.И.², Адамова Л.Е.³

¹Институт искусственного интеллекта Российского технологического университета МИРЭА
119454, Проспект Вернадского, д. 78, Москва, Россия

²АО НИИ Вычислительных комплексов им. М. А. Карцева,
117437, ул. Профсоюзная, д. 108, Москва, Россия

³Российский новый университет (РосНОУ),
105005, ул. Радио, д. 22, Москва, Россия

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ИИ НА ОСНОВЕ МИВАРНЫХ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРОДУКЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Производство хлебобулочных изделий включает множество этапов, начиная с подготовки сырья и заканчивая упаковкой готовой продукции. Одной из ключевых задач в этой области является обеспечение контроля качества продукции. Проанализированы возможные нарушения в производственной среде хлебобулочных изделий, установлена система факторов, влияющих на них, и построена соответствующая модель прогнозирования. Обосновано, что в области умных производственных систем производства хлебобулочных изделий возможно и целесообразно создание миварной экспертной системы для повышения интеллектуализации принятия решений и обработки информации. Разработана миварная база знаний, включающая 54 миварных правила «Если, То», для обнаружения дефектов продукции на производстве хлебобулочных изделий. Обоснован потенциал новых возможностей для дальнейшего внедрения на различные этапы производства миварного подхода в комплексе с алгоритмами машинного обучения и нейронными сетями. Это позволит повысить качество производимой продукции и перейти на новый уровень создания автоматизированных систем управления производственными системами в области производства хлебобулочных изделий.

Ключевые слова: миварный подход, искусственный интеллект, обнаружение дефектов, КЭСМИ Wi!Mi РАЗУМАТОР, миварные технологии, миварные экспертные системы, машинное обучение, хлебобулочные изделия, машинное зрение.

Golobokov A.M.¹, Kokhanov A.A.¹, Katz I.D.¹, Mutina E.I.², Adamova L.E.³

¹Institute of Artificial Intelligence of the Russian Technological University MIREA
119454, Vernadsky ave., bld. 78, Moscow, Russia

²JSC M. A. Kartsev Research Institute of Computing Systems,
117437, Profsoyuznaya st., bld. 108, Moscow, Russia

³Russian New University (RosNOU),
105005, st. Radio, 22, Moscow, Russia

COMPLEX AI SYSTEM BASED ON MIVAR AND NEURAL NETWORKS FOR DETECTION OF PRODUCT DEFECTS IN BAKERY PRODUCTS PRODUCTION

The production of bakery products includes many stages, from the preparation of raw materials to the packaging of finished products. One of the key tasks in this area is to ensure product quality control. Possible violations in the production environment of bakery products are analyzed, a system of factors influencing them is established, and a corresponding forecasting model is built. It is substantiated that in the field of smart production systems for the production of bakery products, it is possible and advisable to create a mivar expert system to increase the intellectualization of decision-making and information processing. A mivar knowledge base has been developed, including 54 mivar "If, Then" rules, to detect product defects in the production of bakery products. The potential of new opportunities for further implementation of the mivar approach in combination with machine learning algorithms and neural networks at various stages of production is substantiated. This will improve the quality of manufactured products and move to a new level of creating automated control systems for production systems in the field of bakery production.

Keywords: mivar approach, artificial intelligence, defect detection, Wi!Mi RAZUMATOR, mivar technologies, mivar expert systems, machine learning, bakery products, machine vision.

Введение

Хлебопекарная промышленность занимает важное место в пищевой индустрии, обеспечивая производство одного из базовых продуктов питания – хлеба. Процесс производства хлеба включает множество этапов, начиная с подготовки сырья и заканчивая упаковкой готовой продукции. Одной из ключевых задач в этой области является обеспечение контроля качества продукции, поскольку ошибки на различных стадиях производства могут привести к ухудшению характеристик хлеба, что отрицательно сказывается на репутации производителя и уровне удовлетворенности потребителей. Решение этих проблем может быть получено в новом научно-практическом направлении «Умные производственные системы» (УМПС) для которых целесообразно использовать методы и модели искусственного интеллекта (ИИ).

В области ИИ наибольший интерес для УМПС в пищевой индустрии представляют научные исследования миварных технологий [1] логического ИИ, которые успешно и широко используются во многих областях науки и техники. Например, только в 2024 году миварные технологии применяли: в медицине для исследования слуха [2], для обеспечения контроля функций внешнего дыхания [3] и для подбора полезных продуктов [4]; для создания систем принятия решений (СПР) роботов [5] на процессорах Эльбрус [6]; для подбора тренажеров [7] и для контроля микроклимата в оранжерее [8]; а в робототехнике для динамического планирования траекторий роботов [9], включая и 3D пространство [10].

Обзор литературных источников показал, что миварные сети успешно применяли для моделирования АСУТП в формате двудольных и трехдольных графов [11]; для поддержки принятия решения по категорированию критической информационной инфраструктуры [12]; для распознавания образов при сегментации деревьев [13], для принятия обоснованных решений при обнаружении падения людей [14]; для поддержки принятия решения по обеспечению функционирования высоконагруженного безотказного кластера [15], для оценки содержимого пакетных данных в локальной сети [16]; для выбора алгоритма консенсуса распределённых реестров [17]; для «облачного» создания миварных баз знаний (МБЗ) [18], а также на основе использования больших лингвистических моделей [19], включая и возможности автоматического создания МБЗ [20].

Целью данной работы является создание миварной экспертной системы для описания процессов принятия решений, обработки информации в области хлебопекарной промышленности для контроля качества хлебных изделий.

Научная новизна заключается в создании новой математической модели в формате двудольных ориентированных графов миварных сетей в виде продукционных правил «Если, То» в области производства хлебобулочных изделий для контроля их качества.

Для области умных производственных систем наиболее важное значение имеет опыт применения миварных технологий в робототехнике [8-10]. Исследование по применению в комплексе технологий ИИ на основе использования миварных и нейронных сетей для умных производственных систем по производству хлебобулочных изделий и контроля их качества целесообразно проводить в рамках создания Больших Знаний [21].

Таким образом, тема работы актуальна и имеет важное практическое значение.

Постановка задачи. Для успешного создания миварной экспертной системы (МЭС) в области умных производственных систем для контроля качества хлебных изделий необходимо: провести системный анализ предметной области в плане при-

нятия решений, обработки информации и ИИ; формализовать описание предметной области; разработать в виде табличного представления модель описания принятия решений, обработки информации и ИИ в предметной области в формализме миварных сетей – двудольных ориентированных графов, т.е. создание миварной базы знаний (МБЗ) в виде табличного представления; разработать или выбрать метод и алгоритмы решения задач принятия решений, обработки информации и ИИ в предметной области; разработать или реализовать миварную сеть предметной области в специальном математическом и алгоритмическом обеспечении систем принятия решений, обработки информации и ИИ (например, в КЭСМИ Wi!Mi Разуматоре версии 2.1).

Также необходимо провести тестирование полученных миварных моделей предметной области умных производственных систем для контроля качества хлебных изделий и затем обеспечить эволюционное развитие созданной миварной экспертной системы предметной области умных производственных систем. Таким образом, получаем, что для создания МЭС в области умных производственных систем необходимо провести разноплановую научную и практическую работу причем силами людей разных специальностей, которые должны быть объединены в коллектив. Перейдем к решению нашей задачи создания МЭС в области УмПС по производству хлебобулочных изделий.

Анализ предметной области

Описание хлебопекарного производства. Процесс производства хлебных изделий включает несколько основных этапов:

- Подготовка сырья: На этом этапе проверяют качество основных ингредиентов (муки, воды, соли, сахара, дрожжей и добавок). Если используются дополнительные компоненты (например, семена, сухофрукты или специи), их также подготавливают.
- Замес теста: Все ингредиенты смешиваются в определённых пропорциях. Замес выполняется вручную или с помощью тестомесильных машин до получения однородной массы с нужной консистенцией.
- Брожение: Замешанное тесто оставляют в покое на определённое время при контролируемой температуре и влажности. В процессе брожения дрожжи выделяют углекислый газ, который разрыхляет тесто и придает будущему хлебу пористую структуру.
- Деление и формовка: Тесто делят на порции нужного размера и формируют в соответствии с желаемым видом изделия (батон, круглый хлеб, багет и т.д.).
- Расстойка: Заготовки оставляют в расстоечных шкафах, чтобы тесто "подшло". Это позволяет улучшить структуру, объём и вкус готового изделия.
- Выпечка: Заготовки помещают в печь и выпекают при определённой температуре. Этот процесс завершает формирование структуры и вкуса хлеба.
- Охлаждение: После выпечки хлеб охлаждают, чтобы он приобрёл стабильную форму, а влага равномерно распределилась внутри.
- Упаковка и хранение: Остывший хлеб упаковывают для сохранения свежести. Готовую продукцию хранят при соответствующих условиях, чтобы избежать потери качества.

Каждый из этапов представляет собой потенциальный источник дефектов, что требует внедрения автоматизированных систем контроля.

Роль машинного зрения

Система машинного зрения представляет собой сочетание аппаратных и программных компонентов, предназначенных для анализа изображений в реальном времени. Основные элементы системы включают:

- Камеры высокого разрешения: позволяют фиксировать мельчайшие дефекты на поверхности изделий.
- Источники света: равномерное освещение продукции критично для получения качественного изображения.
- Программное обеспечение: алгоритмы анализа изображений и искусственного интеллекта, обученные на выборках с дефектами и без них.

Применение таких систем на этапах выпечки и упаковки позволяет выявлять отклонения от стандартов в режиме реального времени, мгновенно отбраковывая дефектные изделия.

Преимущества автоматизации контроля качества. Внедрение машинного зрения на хлебопекарных предприятиях обеспечивает:

- Высокую скорость анализа: системы обрабатывают сотни изделий в минуту, что значительно превосходит возможности ручного контроля.
- Повышение точности: автоматизация минимизирует человеческий фактор, уменьшая вероятность прохода дефектов.
- Снижение затрат: благодаря сокращению брака и оптимизации производственных процессов уменьшаются общие издержки.
- Улучшение репутации бренда: высокое качество продукции укрепляет доверие потребителей и способствует росту продаж.

Формализация процесса управления является одним из ключевых этапов внедрения автоматизированных систем на производстве. Она позволяет структурировать управление объектами и процессами, обеспечивая четкие критерии для принятия решений. В рамках контроля качества хлебных изделий использование машинного зрения требует разработки и описания алгоритмов взаимодействия системы с объектами контроля, механизмами управления и исполнительными элементами. Рассмотрим структуру процесса управления, этапы принятия решений, основные алгоритмы работы и их интеграция с системой машинного зрения.

Общая структура системы управления. Система управления качеством на хлебопекарном производстве с использованием машинного зрения может быть представлена в виде следующих компонентов:

- Объект управления: изделия, поступающие на проверку (хлеб).
- Контролируемые параметры: форма, размер, цвет.
- Средства контроля: камеры машинного зрения и программные алгоритмы анализа изображений.
- Управляющий модуль: компьютер или контроллер, координирующий работу всех компонентов.
- Программное обеспечение: алгоритмы анализа изображений, нейронные сети и модели принятия решений.

Процесс управления системой машинного зрения можно разделить на несколько этапов:

1. Сбор данных. Камеры, установленные над конвейером, фиксируют изображения изделий. Для улучшения качества изображения используются системы освещения, обеспечивающие равномерное освещение объекта. Собранные данные передаются в управляющий модуль для обработки.

2. Обработка данных. Обработка изображений включает следующие этапы:
 - Предварительная обработка: устранение шума, коррекция яркости и контрастности.
 - Сегментация: выделение области изображения, содержащей хлебное изделие.
 - Анализ параметров: измерение размеров, формы и цвета изделия.
 - Сравнение с эталоном: выявление отклонений от заданных стандартов.
3. Принятие решений. На основе анализа данных система принимает решение о соответствии изделия стандартам. Решения делятся на:
 - Соответствие: изделие соответствует требованиям и продолжает движение по конвейеру.
 - Несоответствие: изделие удаляется с конвейера для дальнейшего анализа или утилизации.
4. Исполнение решений. Оператор, получив сигнал о бракованной продукции от системы контроля качества, отправляется сигнал сотрудникам рассредоточенным на производственной линии, обеспечивают удаление дефектных изделий с производственной линии.

Формализация процесса управления в виде правил. Для описания процессов управления применяется система правил вида «Если — То». Это позволяет чётко описать алгоритмы действий системы в зависимости от входных данных. Примеры формализованных правил для различных этапов контроля:

Правила для анализа формы:

- ЕСЛИ ширина изделия < 8 см ИЛИ ширина изделия > 12 см, ТО пометить изделие как дефектное.
- ЕСЛИ изделие имеет форму, отличную от заданной, ТО классифицировать как дефектное.

Правила для анализа цвета:

- ЕСЛИ цвет изделия светлее эталона более чем на 20%, ТО указать на недостаточную выпечку.
- ЕСЛИ цвет изделия темнее эталона более чем на 30%, ТО указать на пережарку.

Правила для сортировки:

- ЕСЛИ изделие помечено как дефектное, ТО отправить сигнал исполнительному устройству для удаления изделия с линии.

Общий алгоритм работы системы

Инициализация системы:

- Загрузка параметров контроля и эталонных характеристик.
- Проверка связи с камерами и исполнительными устройствами.

Непрерывный процесс обработки:

- Фиксация изображения изделия.
- Обработка данных и сравнение с эталонами.
- Принятие решений.

Выполнение действий:

- Продолжение движения изделий, соответствующих стандартам.
- Удаление дефектных изделий.

Запись данных:

- Логирование параметров всех проверенных изделий.
- Сохранение данных для анализа и обучения моделей.

Взаимодействие системы с операторами. Система управления взаимодействует с оператором для мониторинга и управления процессом. Основные функции интерфейса оператора:

- Просмотр статистики: количество проверенных изделий, процент дефектов.
- Ручная корректировка параметров: изменение эталонных значений и настроек чувствительности.
- Уведомления о сбоях: информация о неисправностях в системе или превышении допустимого количества дефектов.

Преимущества формализованного управления.

- Упрощение разработки: чёткие правила облегчают разработку и тестирование системы.
- Повышение точности: формализованные подходы позволяют минимизировать ошибки.
- Адаптивность: возможность быстрой настройки системы под изменения требований.
- Прозрачность: логика управления легко интерпретируется и проверяется.
- Ограничения формализованных моделей.
- Зависимость от качества данных: ошибки в сборе данных могут повлиять на точность решений.
- Сложность настройки: разработка правил требует анализа большого объёма данных и учёта множества факторов.
- Ограниченная гибкость: при изменении характеристик изделий требуется пересмотр множества правил.

Схема формализованного процесса управления показана в таблице 1.

Таблица 1 – схема формализованного процесса

Этап	Действие	Решение
Фиксация изображения	Камера фиксирует изображение изделия	Данные передаются на обработку
Анализ формы	Сравнение размеров изделия с эталонными значениями	Если отклонения обнаружены, пометить изделие как дефектное
Анализ цвета	Сравнение цветовых характеристик	Определить степень соответствия: нормальное, недопечённое, пережаренное
Исполнение решения	Управление устройством	Удалить изделие с линии или продолжить его движение

Применение машинного обучения для оптимизации. Использование формализованных правил дополняется обучением нейронных сетей. Такие модели автоматически выявляют новые закономерности и обновляют существующие правила на основе данных, полученных в процессе эксплуатации системы.

Этапы обучения:

- Сбор данных о дефектах.
- Обработка и разметка данных (например, изображения с метками «дефект» и «норма»).
- Обучение модели машинного зрения.

Результаты интеграции:

- Повышение точности идентификации дефектов.

- Возможность адаптации к новым условиям производства.

Преимущества автоматизации контроля качества. Внедрение машинного зрения на хлебопекарных предприятиях обеспечивает:

- Высокую скорость анализа: системы обрабатывают сотни изделий в минуту, что значительно превосходит возможности ручного контроля.
- Повышение точности: автоматизация минимизирует человеческий фактор, уменьшая вероятность прохода дефектов.
- Снижение затрат: благодаря сокращению брака и оптимизации производственных процессов уменьшаются общие издержки.
- Улучшение репутации бренда: высокое качество продукции укрепляет доверие потребителей и способствует росту продаж.

Формализованное описание предметной области в виде правил «Если, То»

Разработка миварной базы знаний. МБЗ для контроля качества хлебных изделий состоит из следующих основных компонентов:

Объекты контроля:

- Изделие.
- Форма.
- Размеры.
- Цвет.

Параметры контроля:

- Геометрические: ширина, высота, радиус.
- Цветовые: индекс цвета, равномерность цвета.

Правила анализа:

- Определение дефектов на основе отклонений параметров от эталонов.
- Принятие решений о соответствии изделия стандартам.

Связи между объектами:

- Взаимосвязь параметров (например, форма влияет на распределение цвета).
- Зависимости между этапами контроля (например, проверка формы происходит перед анализом цвета).

Покажем пример разработанных правил принятия решений по этапам.

- С1. Подготовка сырья
 1. Если мука не соответствует стандартам качества (например, цвет, влажность, отсутствие примесей), то заблокировать использование партии муки и уведомить оператора.
 2. Если мука соответствует стандартам, то отправить её на этап просеивания.
 3. Если ингредиенты (вода, соль) не соответствуют требованиям по составу или температуре, то выдать предупреждение оператору и остановить процесс.
 4. Если ингредиенты соответствуют стандартам, то отправить на этап смешивания.
 5. ЕСЛИ на текущей стадии подготовки сырья ошибка, ТО остановить процесс замешенного теста, ИНАЧЕ продолжить работу.
 6. ЕСЛИ проверка Качества Муки провалилась, ТО не учитывать Количество Соли, Примеси Муки, Температуру воды, Чистоту воды.
 7. ЕСЛИ проверка Количество Соли провалилась, ТО не учитывать Качество Муки, Примеси Муки, Температуру воды, Чистоту воды.
 8. ЕСЛИ проверка Примеси Муки провалилась, ТО не учитывать Качество Муки, Количество Соли, Температуру воды, Чистоту воды.

9. ЕСЛИ проверка Температуры воды провалилась, ТО не учитывать Качество Муки, Количество Соли, Примеси Муки, Чистоту воды.
10. ЕСЛИ проверка Чистоты воды провалилась, ТО не учитывать Качество Муки, Количество Соли, Примеси Муки, Температуру воды.
- С2. Замес теста
 1. Если все ингредиенты добавлены в нужной пропорции, то запустить тестомесильную машину.
 2. Если пропорции ингредиентов нарушены, то остановить процесс и уведомить оператора.
 3. Если консистенция теста не соответствует заданным параметрам, то скорректировать время замеса или количество ингредиентов.
 4. Если температура теста превышает норму, то уменьшить скорость замеса или температуру помещения.
 5. Если время замеса завершено, то отправить тесто на этап ферментации.
 6. ЕСЛИ на текущей стадии замешенного теста ошибка, ТО остановить процесс брожения, ИНАЧЕ продолжить работу.
 7. ЕСЛИ проверка Консистенции замешенного теста провалилась, ТО не учитывать Массу порции теста, Температуру замешенного теста.
 8. ЕСЛИ проверка Массы порции теста провалилась, ТО не учитывать Консистенцию замешенного теста, Температуру замешенного теста.
 9. ЕСЛИ проверка Температуры замешенного теста провалилась, ТО не учитывать Консистенцию замешенного теста, Массу порции теста.
- С3. Ферментация (брожение)
 1. Если температура ферментации ниже 30°C, то увеличить подогрев.
 2. Если тесто не увеличивается в объёме, то проверить активность дрожжей и при необходимости заменить их.
 3. Если время ферментации завершено и объём теста увеличился в 2 раза, то отправить на этап деления и формовки.
 4. ЕСЛИ на текущей стадии брожения ошибка, ТО остановить процесс деления и формовки, ИНАЧЕ продолжить работу.
 5. ЕСЛИ проверка Выдержки теста для активизации дрожжей провалилась, ТО не учитывать Массу порции теста, Объём теста.
 6. ЕСЛИ проверка Массы порции теста провалилась, ТО не учитывать Выдержку теста для активизации дрожжей, Объём теста.
 7. ЕСЛИ проверка Объёма теста провалилась, ТО не учитывать Выдержку теста для активизации дрожжей, Массу порции теста.
- С4. Деление и формовка
 1. Если масса порции теста не соответствует заданной норме, то отрегулировать работу делительной машины.
 2. Если разделение теста завершено, то отправить порции на этап формовки.
 3. Если форма заготовки не соответствует требуемой (например, батон, булка), то скорректировать настройки формовочной машины.
 4. Если заготовки сформированы правильно, то отправить их на этап расстойки.
 5. ЕСЛИ на текущей стадии деления и формовки ошибка, ТО остановить процесс расстойки, ИНАЧЕ продолжить работу.
 6. ЕСЛИ проверка Заготовки формы провалилась, ТО не учитывать Поверхностные дефекты заготовки.
 7. ЕСЛИ проверка Поверхностных дефектов заготовки провалилась, ТО не учитывать Заготовку формы

- С5. Расстойка

1. Если температура в расстоечном шкафу ниже 35°C или влажность ниже 75%, то скорректировать настройки шкафа.
2. Если заготовки не увеличиваются в объеме, то проверить качество теста и условия расстойки.
3. Если расстойка завершена, то отправить заготовки на этап выпечки.
4. ЕСЛИ на текущей стадии расстойки ошибка, ТО остановить процесс выпечки, ИНАЧЕ продолжить работу.
5. ЕСЛИ проверка Влажности расстойки провалилась, ТО не учитывать Объем расстойки, Температуру расстойки.
6. ЕСЛИ проверка Объема расстойки провалилась, ТО не учитывать Влажность расстойки, Температуру расстойки.
7. ЕСЛИ проверка Температуры расстойки провалилась, ТО не учитывать Влажность расстойки, Объем расстойки.

- С6. Выпечка

1. Если температура печи ниже заданной, то увеличить нагрев.
2. Если время выпечки завершено, то проверить степень готовности изделий.
3. Если изделия имеют равномерный цвет и сформированную корочку, то отправить их на этап охлаждения.
4. Если изделия пережарены или недопечены, то уведомить оператора для анализа и корректировки.
5. ЕСЛИ на текущей стадии выпечки ошибка, ТО остановить процесс охлаждения, ИНАЧЕ продолжить работу.
6. ЕСЛИ проверка Поверхностных дефектов выпечки провалилась, ТО не учитывать Равномерность цвета выпечки, Температуру печи, Цвет корки выпечки.
7. ЕСЛИ проверка Равномерности цвета выпечки провалилась, ТО не учитывать Поверхностные дефекты выпечки, Температуру печи, Цвет корки выпечки.
8. ЕСЛИ проверка Температуры печи провалилась, ТО не учитывать Поверхностные дефекты выпечки, Равномерность цвета выпечки, Цвет корки выпечки.
9. ЕСЛИ проверка Цвета корки выпечки провалилась, ТО не учитывать Поверхностные дефекты выпечки, Равномерность цвета выпечки, Температуру печи.

- С7. Охлаждение

1. Если температура изделий выше 30°C после охлаждения, то продлить время охлаждения или уменьшить температуру помещения.
2. Если охлаждение завершено, то отправить изделия на этап упаковки.
3. ЕСЛИ на текущей стадии охлаждения ошибка, ТО остановить процесс упаковки и хранения, ИНАЧЕ продолжить работу.

- С8. Упаковка и хранение

1. Если упаковка повреждена, то заменить её и уведомить оператора.
2. Если упаковка герметична, то отправить хлеб на хранение.
3. Если температура хранения выше 20°C или влажность превышает 70%, то скорректировать параметры хранения.
4. Если условия хранения соответствуют нормам, то завершить процесс производства.
5. ЕСЛИ проверка Влажности хранения провалилась, ТО не учитывать Герметичность упаковки, Температуру хранения, Целостность упаковки.
6. ЕСЛИ проверка Герметичности упаковки провалилась, ТО не учитывать Влажность хранения, Температуру хранения, Целостность упаковки.

7. ЕСЛИ проверка Температуры хранения провалилась, ТО не учитывать Влажность хранения, Герметичность упаковки, Целостность упаковки.
8. ЕСЛИ проверка Целостности упаковки провалилась, ТО не учитывать Влажность хранения, Герметичность упаковки, Температуру хранения.

Тестирование системы

В связи с ограниченным объемом публикации, покажем только один пример такого тестирования из всех проведенных. После ввода всех правил система тестируется. Система проверяет параметры на отсутствие дефектов.

На рисунке 1 показано, как проводилось тестирование системы. Значения, вычисленные во время работы алгоритма, выделены красным цветом. На значении для расчета, которое необходимо найти, ставится галочка, и система начинает поиск расчета в соответствии с уже заданными правилами. Результаты испытаний показывают, что на этапе брожения теста произошла ошибка. Результаты тестирования на данном этапе не соответствуют ожиданиям, партия отправляется на утилизацию.

Граф алгоритма решения (логического вывода) показан на рисунке 2. В результате получается, что можно увидеть не только требуемый результат, но и ход решения как в текстовом, так и графическом виде с помощью графа алгоритма принятия решения.

Объект	Значение	Найти
МЭС С1 Качество Муки 1 Количество Соли 1 Примеси Муки 1 Состояние подготовки сырья 1 Температура воды 1 Чистота воды 1		
С2 Консистенция замешенного теста 1 Масса порции теста 1 Состояние замешенного теста 1 Температура замешенного теста 1		
С3 Выдержка теста для активизации дрожжей 1 Масса порции теста 1 Объём теста 0 Состояние брожения 0		

Рисунок 1 – Классы и параметры в «КЭСМИ Wi!Mi Разуматор»

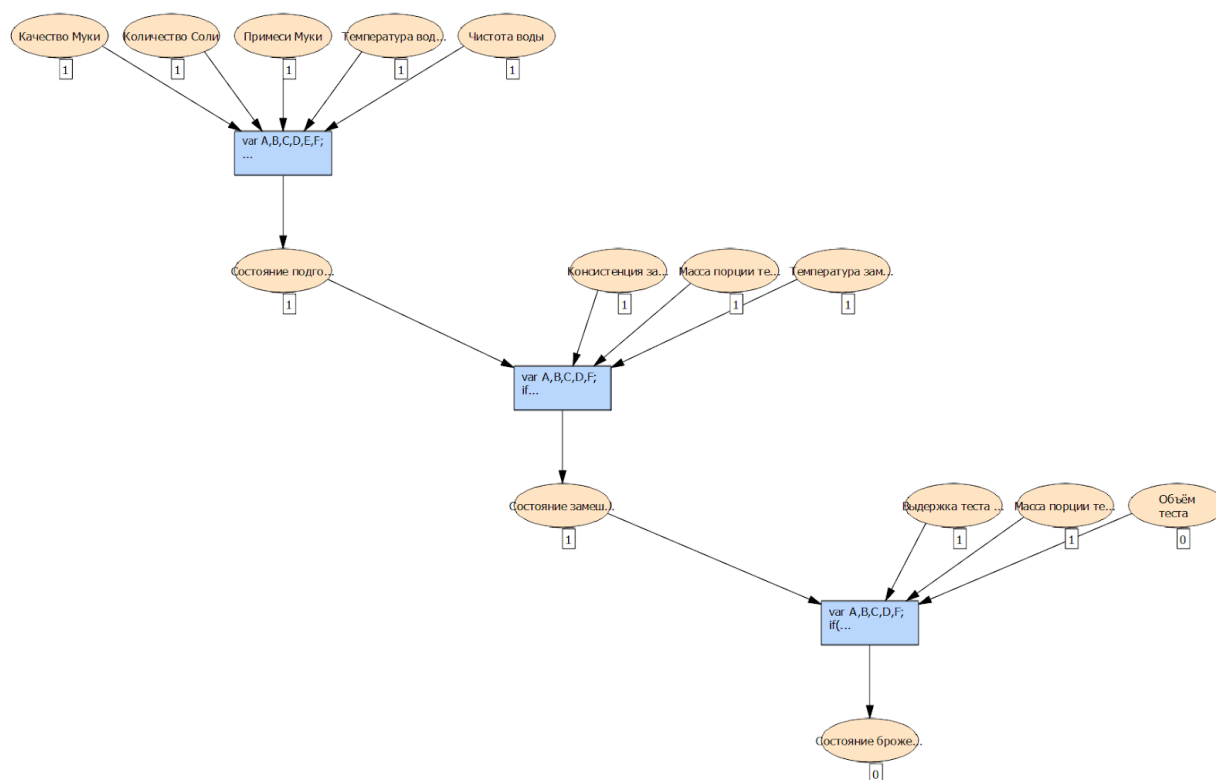


Рисунок 2 – Граф алгоритма решения в результате работы миварной экспертной системы

Заключение

Выполненное научное исследование показало, что в области умных производственных систем производства хлебобулочных изделий возможно и целесообразно создание миварной экспертной системы для повышения интеллектуализации принятия решений и обработки информации. Это позволит повысить качество производимой продукции и перейти на новый уровень создания автоматизированных систем управления производственными системами, как минимум, в области производства хлебобулочных изделий.

Целью данной работы является создание миварной экспертной системы для описания процессов принятия решений, обработки информации в области хлебопекарной промышленности для контроля качества хлебных изделий. Такая МЭС будет использоваться в комплексной системе ИИ, создаваемой на основе миварных и нейронных сетей для контроля качества хлебных изделий.

Научная новизна заключается в создании новой математической модели из 54 продукционных правил в формате двудольных ориентированных графов миварных сетей в области производства хлебобулочных изделий. Успешно реализована миварная сеть предметной области в специальном математическом и алгоритмическом обеспечении КЭСМИ Wi!Mi Разуматоре версии 2.1, а также проведено тестирование миварных моделей предметной области умных производственных систем производства хлебобулочных изделий.

Эволюционное развитие созданной миварной экспертной системы предметной области умных производственных систем производства хлебобулочных изделий обеспечивается тем, что МЭС обладает свойством эволюционности и в любой момент времени может быть добавлено, изменено или удалено любое правило. Отметим, что в ходе выполнения проекта именно таким способом эволюционно добавлялись новые правила по процессам принятия решений и обработки информации производства хлебобулочных изделий.

Список литературы

1. Варламов, О.О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. Миварное информационное пространство. М.: «Радио и связь», 2002. 286 с. EDN RWTСOP.
2. Штрак, А.А. Миварная база знаний для автоматизации исследования открытого артериального протока и слуха // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 548-556. EDN SXPYDW.
3. Клинова, В.К. МБЗ портативного спирометра для обеспечения индивидуального контроля функций внешнего дыхания // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 557-561. EDN GHUNIK.
4. Аброчнов, Е.С., Соловьева, А.М., Макеев, В.А. и др. МЭС подбора полезных продуктов // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 536-542. EDN MRBKXS.
5. Синицын, Л.С. Платформа для СПР робота на базе гибридной интеллектуальной системы // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 384-388. EDN QOSPPH.
6. Плешаков, В.И. Разработка миварной машины логического вывода для процессора Эльбрус // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 450-454. EDN EJДСAK.
7. Коваленко, А.В., Кондрахин, С.С., Смыслов, Д.О. МЭС по подбору игрового тренажера для развития навыков управления транспортным средством // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 67-72. EDN ZOXOUI.
8. Федюнев, А.Ю., Нестеров, Ю.Г., Правдина, А.Д. МЭС для контроля микроклимата в оранжерее // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 107-112. EDN HSWYСJ.
9. Шэнь, Ц. и др. Динамическое планирование траектории робота на основе семантического обнаружения объектов с использованием миварной экспертной системы // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 4(35). С. 164-176. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-164-176. EDN DHVOFC.
10. Коценко, А.А. Разработка моделей миварного логического пространства для обеспечения трехмерного движения автономных роботов // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 361-366. EDN HBLZQY.
11. Коценко, А.А. Анализ применения для АСУТП миварных сетей в формате двудольных и трехдольных графов // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 432-438. EDN GLJGZV.
12. Хабчаева, А.Р., Чежегова, П.А. и др. МЭС для категорирования КИИ в АСУТП // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 37-41. EDN VEAGPO.
13. Ovchinnikov, D.A., Milevich, A.A., Fonin, M.A. et al. MES for improving the segmentation of trees from a point cloud // MIVAR'24, 2024. P. 293-297. EDN NOGUPU.
14. Мащенко, Е.И., Карпов, Д.К., Варламов, О.О. и др. Создание миварной экспертной системы для понимания образов и принятия решений при обнаружении падений людей // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 4(35). С. 88-100. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-88-100. EDN FGLHZR.
15. Рудзинский, В.В. МБЗ техподдержки высоконагруженного безотказного кластера // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 169-173. EDN ZJYOTC.
16. Старых, Ф.А. МЭС оценки содержимого пакетных данных в локальной сети // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 102-106. EDN FKVQMO.
17. Подопригорова, Н.С., Козырев, С.А., Подопригорова, С.С. и др. Разработка миварной экспертной системы для выбора алгоритма консенсуса распределённых реестров // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 4(35). С. 126-138. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-126-138. EDN AVXOTO.
18. Абдрашитова, А.Н., Вардумян, А.Т., Головацкий, А.Д. и др. Облачная система создания МБЗ // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 455-459. EDN LKDKGC.
19. Чувиков, Д.А., Ким, Р.И., Балдин, А.В. Анализ больших языковых моделей для построения диалоговых систем // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 426-431. EDN IWVZPS.
20. Andreev, A. et al. Text processing using LLM for automatic creation of agricultural crops knowledge bases // Bio Web of Conferences : International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2024). Vol. 130. Les Ulis: EDP Sciences, 2024. P. 01029. DOI 10.1051/bioconf/202413001029. EDN YTLLMF.
21. Варламов, О.О. 2024: обзор областей применения миварных технологий ЛИИ // МИВАР'24 : Сборник научных статей. Москва: ИНФРА-М, 2024. С. 7-15. EDN ATMAZU.

References

1. Varlamov O.O. Evolutionary databases and knowledge for adaptive synthesis of intelligent systems. Mivar information space. Moscow: "Radio and Communications", 2002. 286 p. EDN RWTCOP.
2. Strak A.A. Mivar knowledge base for automating the study of the open ductus arteriosus and hearing // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 548-556. EDN SXPYDW.
3. Klinova V.K. MBZ portable spirometer for individual monitoring of respiratory functions // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 557-561. EDN GHUNIK.
4. Abrochnov E.S., Solovyova A.M., Makeev V.A. and others. MES selection of useful products // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 536-542. EDN MRBKXC.
5. Sinitsyn L.S. A platform for a SPR robot based on a hybrid intelligent system // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 384-388. EDN QOSPPI.
6. Pleshakov V.I. Development of a mivar logical output machine for the Elbrus processor // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 450-454. EDN EJDCAK.
7. Kovalenko A.V., Kondrakhin S.S., Smyslov D.O. MES on the selection of a game simulator for the development of vehicle driving skills // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 67-72. EDN ZOXOUI.
8. Fedyuney A.Yu., Nesterov Yu.G., Pravdina A.D. MES for microclimate control in a greenhouse // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 107-112. EDN HSWYCI.
9. Shen Ts. and others. Dynamic trajectory planning of a robot based on semantic object detection using a mivar expert system // Problems of artificial intelligence. 2024. No. 4(35). pp. 164-176. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-164-176. EDN DHVOFC.
10. Kotsenko A.A. Development of models of mivar logical space to ensure three-dimensional movement of autonomous robots // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 361-366. EDN HBLZQY.
11. Kotsenko A.A. Analysis of the application of mivar networks in the format of bipartite and three-sided graphs for automated control systems // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 432-438. EDN GLJGZV.
12. Khabchaeva A.R., Chezhogova P.A. and others. MES for CII categorization in automated control systems // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 37-41. EDN VEAGPO.
13. Ovchinnikov D.A., Milevich A.A., Fonin M.A. et al. MES for improving the segmentation of trees from a point cloud // MIVAR'24, 2024. P. 293-297. EDN NOGUPU.
14. Mashchenko E.I., Karpov D.K., Varlamov O.O. and others. Creation of a mivar expert system for understanding images and making decisions when detecting human falls // Problems of artificial intelligence. 2024. No. 4(35). pp. 88-100. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-88-100. EDN FGLHZA.
15. Rudzinsky V.V. MBZ technical support for a highly loaded trouble-free cluster // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 169-173. EDN ZJYOTC.
16. Starykh F.A. MES assessment of the contents of packet data in a local network // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 102-106. EDN FKVQMO.
17. Podoprigozova N.S., Kozyrev S.A., Podoprigozova S.S. and others. Development of a mivar expert system for selecting a consensus algorithm for distributed registries // Problems of artificial intelligence. 2024. No. 4(35). pp. 126-138. DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-126-138. EDN AVXOTO.
18. Abdrashitova A.N., Vardumyan A.T., Golovatsky A.D. and others. Cloud-based MBZ creation system // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 455-459. EDN LKDKGC.
19. Chuvikov D.A., Kim R.I., Baldin A.V. Analysis of large language models for building dialog systems // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 426-431. EDN IWVZPS.
20. Andreev A. et al. Text processing using LLM for automatic creation of agricultural crops knowledge bases // Bio Web of Conferences : International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2024). Vol. 130. Les Ulis: EDP Sciences, 2024. P. 01029. DOI 10.1051/bioconf/202413001029. EDN YTLLMF.
21. Varlamov O.O. 2024: an overview of the fields of application of mivar technologies of the LII // MIVAR'24 : Collection of scientific articles. Moscow: INFRA-M, 2024. pp. 7-15. EDN ATMAZU.

RESUME

*Golobokov A.M., Kokhanov A.A., Katz I.D., Mutina E.I., Adamova L.E.
Complex AI System Based On Mivar And Neural Networks For Detection Of
Product Defects In Bakery Products Production*

Quite a lot of work has been devoted to the research of smart production systems. For the first time, this work substantiates the possibility of using advanced logical artificial intelligence technologies to enhance the intellectualization of automated control systems of production systems and thus create smart production systems. The main innovation of our work is the creation of the mivar expert system (MES) in the field of smart production systems for the production of bakery products. A new approach to applying the methods of the scientific specialty "system analysis, management and information processing" in this applied field is substantiated and practically demonstrated.

It is important to note that a team of specialists was created to carry out this scientific project, including: experts in the subject area of an industrial bakery facility; cognitive scientists (knowledge engineers) who created "Knowledge" in the form of a textual formalized description of the subject area; analysts who developed the "Knowledge" received from cognitive scientists in the form of formal mivar networks (bipartite directed graphs) based on a formalized description of the domain, and also uploaded this knowledge into the Wi!Mi Razumator version 2.1; developers of special mathematical and algorithmic support for decision-making systems, information processing and artificial intelligence in the created smart production system; testers of special mathematical and algorithmic support for decision-making systems, information processing and artificial intelligence in our smart production system.

The scientific research carried out by our team has shown that in the field of intelligent production systems for the production of bakery products, it is possible and advisable to create a multi-level expert system to enhance the intellectualization of decision-making and information processing. This will improve the quality of manufactured products and move to a new level of creation of automated control systems for production systems in the field of bakery products.

In the course of our project, the following works have been successfully completed: a systematic analysis of the subject area in terms of decision-making, information processing and artificial intelligence has been performed; a formalized description of the subject area has been developed; a mivar knowledge base has been created in the form of a tabular representation of 54 rules of the mivar network describing decision-making processes, information processing; the choice of traditional Wi!Mi Razumator of the method and algorithms for solving problems of decision-making, information processing and artificial intelligence in this subject area; the mivar network of the subject area has been implemented in the special mathematical and algorithmic software of Wi!Mi Razumator, mivar models of the subject area of smart production systems for the production of bakery products were tested.

Thus, we get that in order to create an MES in the field of smart production systems, it is necessary to carry out complex, diverse scientific and practical work by people from different specialties, who must be united into one team.

The evolutionary development of the created mivar expert system in the subject area of intelligent bakery production systems is ensured by the fact that the MES has the property of evolutionariness and any rule can be added, changed or deleted at any time. This was verified during the course of the project, when new rules were added evolutionarily for the added decision-making and information processing processes for the production of bakery products.

РЕЗЮМЕ

*Голобоков А.М., Коханов А.А., Кац И.Д., Мутина Е.И., Адамова Л.Е.
Комплексная система ИИ на основе миварных и нейронных сетей для
обнаружения дефектов продукции на производстве хлебобулочных изделий*

Вопросам исследования умных производственных систем посвящено достаточно много работ. Выполненная работа впервые обосновывает возможность применения миварных технологий логического искусственного интеллекта для повышения интеллектуализации автоматизированных систем управления производственных систем и создания, таким образом, умных производственных систем. Основным нововведением нашей работы является создание миварной экспертной системы (МЭС) в области умных производственных систем по производству хлебобулочных изделий. Обоснован и практически продемонстрирован новый подход применения методов научной специальности «системный анализ, управление и обработка информации» в этой прикладной области.

Выполненное нашим коллективом научное исследование показало, что в области умных производственных систем производства хлебобулочных изделий возможно и целесообразно создание миварной экспертной системы для повышения интеллектуализации принятия решений и обработки информации. Это позволит повысить качество производимой продукции и перейти на новый уровень создания автоматизированных систем управления производственными системами в области производства хлебобулочных изделий.

В процессе выполнения нашего проекта успешно выполнены следующие работы: выполнен системный анализ предметной области в плане принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; разработано формализованное описание предметной области; создана миварная база знаний в виде табличного представления 54 правил миварной сети описания процессов принятия решений, обработки информации; обоснован выбор традиционного для КЭСМИ Wi!Mi Разуматор версии 2.1 метода и алгоритмов решения задач принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта в данной предметной области; реализована миварная сеть предметной области в специальном математическом и алгоритмическом обеспечении КЭСМИ Wi!Mi Разуматоре версии 2.1; проведено тестирование миварных моделей предметной области умных производственных систем производства хлебобулочных изделий.

Таким образом, получаем, что для создания МЭС в области умных производственных систем необходимо провести комплексную разноплановую научную и практическую работу силами людей разных специальностей, которые должны быть объединены в один коллектив.

Эволюционное развитие созданной миварной экспертной системы предметной области умных производственных систем производства хлебобулочных изделий обеспечивается тем, что МЭС обладает свойством эволюционности и в любой момент времени может быть добавлено, изменено или удалено любое правило. Это было проверено в ходе выполнения проекта, когда эволюционно добавлялись новые правила по добавляемым процессам принятия решений и обработки информации производства хлебобулочных изделий.

Голобоков Александр Михайлович, студент Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, sashulya.golobokov@mail.ru

Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, умные производственные системы, обработка информации, распознавание образов, кибернетика

Коханов Артем Александрович, студент Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, kokhanov.art@yandex.ru

Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, умные производственные системы, обработка информации, распознавание образов, кибернетика

Кац Илья Дмитриевич, студент Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, katzilya7@gmail.com

Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, умные производственные системы, обработка информации, распознавание образов, кибернетика

Мутина Елена Игоревна, кандидат технических наук, mutina@niivk.ru, старший научный сотрудник АО «НИИ «Вычислительных комплексов»»,

Область научных интересов: вычислительные комплексы, искусственный интеллект, экспертные системы, логика, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации, принятие решений, распознавание образов, понимание естественного языка, кибернетика

Адамова Лариса Евгеньевна, кандидат психологических наук, доцент, доцент кафедры общей психологии и психологии труда, Российский новый университет (РосНОУ), larisapers@yandex.ru

Область научных интересов: психология, искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации

Статья поступила в редакцию 15.01.2025.