

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ПРИОБРЕТЕНИЯ ЗНАНИЙ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ерохин В.В.^{1,2}, Ши Х.²

¹*Московский государственный институт международных отношений
(университет) Министерства иностранных дел РФ, Москва;*

²*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва*

Ключевые слова: экспертная система, машиностроительное производство, модель сбоев, производственный мониторинг, стандартизация данных, производственные испытания.

Аннотация. Статья описывает поэтапную разработку системы сбора экспертных знаний для машиностроительного производства. Основной подход предполагает интеграцию сбора знаний в повседневную работу специалистов через адаптированные интерфейсы. Методология включает: классификацию пользователей (операторы, руководители, инженеры); разработку графического интерфейса для операторов; создание моделей процесса и сбоев; внедрение прототипа с автоматической фиксацией данных. Тестирование прототипа в производственных условиях выявило практические проблемы и подтвердило ценность итеративного подхода для создания эффективной системы сбора знаний. Система демонстрирует потенциал для стандартизации процессов и улучшения контроля качества на производстве.

EXPERT SYSTEM FOR KNOWLEDGE ACQUISITION IN MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTION

Erokhin V.V.^{1,2}, Shi H.²

¹*Moscow state institute of international relations (university), Ministry of Foreign
Affairs of the Russian Federation, Moscow;*

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

Keywords: expert system, mechanical engineering production, failure model, production monitoring, data standardization, production testing.

Abstract. This article describes the step-by-step development of an expert knowledge collection system for mechanical engineering. The primary approach involves integrating knowledge collection into the daily work of specialists through customized interfaces. The methodology includes: user classification (operators, managers, engineers); development of a graphical interface for operators; creation of process and failure models; and implementation of a prototype with automatic data recording. Testing the prototype in a production environment revealed practical challenges and confirmed the value of an iterative approach to creating an effective knowledge collection system. The system demonstrates potential for process standardization and improved quality control in manufacturing.

1. Описание проблемы

Компания-субподрядчик в машиностроении сталкивается с конфликтом между качеством продукта и качеством процесса. Заказчики требуют строгого соответствия своим, часто нетехнологичным, спецификациям, перекладывая проблему качества на субподрядчика, который вынужден балансировать между долгосрочным развитием процессов и сиюминутным выполнением требований [1].

Проблема в том, что настройка производства зависит от личного опыта операторов, а данные – многочисленные, но бесполезные для анализа. Используемые в машиностроении экспертные системы формализуют ключевые параметры, влияющие на качество, и создают инструмент поддержки решений. Это обеспечивает снижение субъективности, позволяет находить скрытые причинно-следственные связи и повышать эффективность реагирования на проблемы [2].

Разработка инструмента управления начинается с обеспечения прослеживаемости не только данных, но и, что важнее, производственного опыта. Сбор и последующий анализ этих обогащённых знаний позволяют значительно усилить контроль над производством [3]. Для этого используется двухэтапный подход, основная идея которого представлена на рисунке 1.

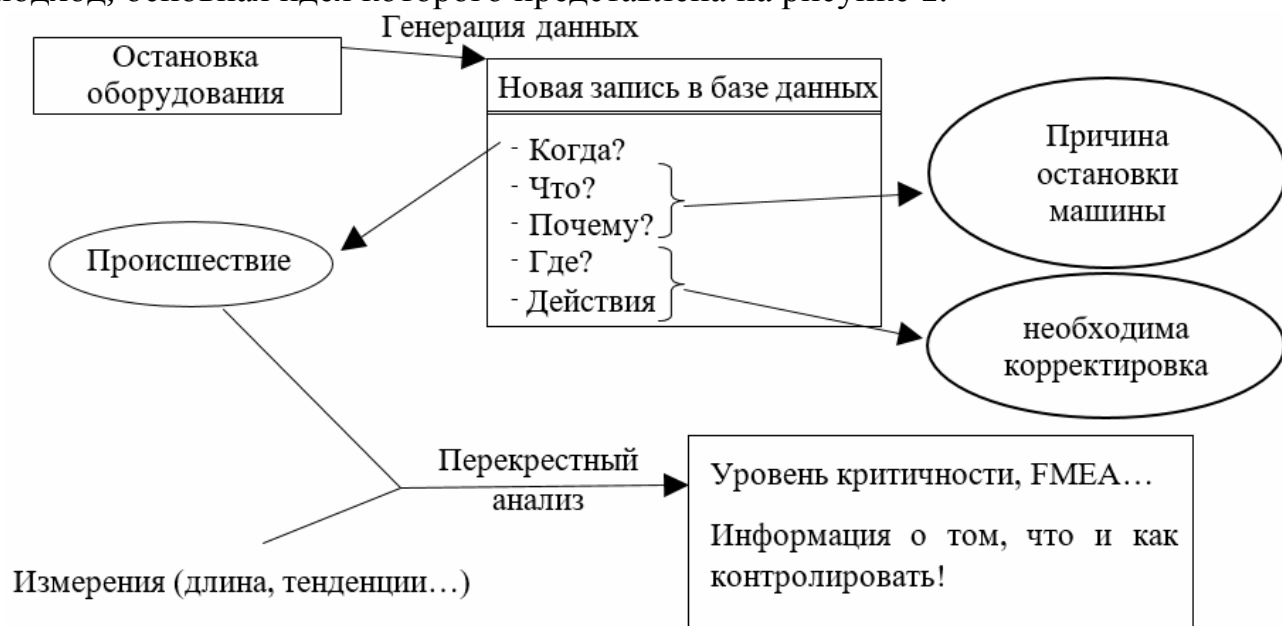


Рис. 1. Схема экспертной системы на большинстве машиностроительных предприятий

Экспертная система (рис. 1) состоит из фаз:

1. Фаза сбора знаний. Система сбора экспертных знаний (ССЭЗ) для фиксации информации о процессах и методах управления. При каждой остановке оборудования из-за неполадки в базе данных создаётся запись, структурированная по трём категориям [4]:

- Время события – для сопоставления с данными из других систем.
- Причина сбоя — по мнению эксперта.
- Корректирующие действия – предпринятые для устранения проблемы.

Этап решает задачу сохранения и систематизации практического опыта.

2. Фаза анализа данных. После решения задачи прослеживаемости накопленные размеченные данные о дефектах продукции используются для автоматического анализа. Это позволяет выявлять тенденции, разрабатывать процедуры для будущих корректирующих действий и формировать стратегии предотвращения брака. В результате углублённого понимания параметров производства и их влияния достигается более высокий уровень контроля над процессами и качества выпускаемой продукции [5].

Такая экспертная система имеет потенциальные недостатки и уязвимые места в управлении производственным процессом изготовления изделий машиностроения:

1. Сильная зависимость от человеческого фактора и субъективизма:

– Качество данных определяется экспертом, т.к. запись причины сбоя и корректирующих действий основана на мнении одного специалиста. Это вносит субъективность – разные эксперты могут по-разному интерпретировать одну и ту же проблему.

– Риск неточной или неполной информации, т.к. операторы или инженеры могут быть перегружены, не иметь времени на детальное описание или сознательно упрощать информацию, чтобы избежать сложного анализа.

– Экспертная система фиксирует знания, но не гарантирует, что они будут правильно поняты и использованы другими сотрудниками. Остается риск утери знаний при уходе ключевых специалистов.

2. Сложность и трудоемкость внедрения и поддержки:

– Сопротивление персонала, т.к. внедрение системы требует от сотрудников дополнительных усилий по документированию каждой проблемы. Без сильной мотивации и поддержки со стороны руководства они могут воспринять это как лишнюю бюрократическую нагрузку.

– Проблема "чистоты" данных, т.к. для эффективного автоматического анализа необходимы четко структурированные и единообразные данные. Если эксперты вносят информацию в свободной форме (например, "причина: вибрация" вместо "причина: ослабление крепления узла X"), система не сможет корректно выявлять тенденции.

– Требуется высокой дисциплины, т.к. процесс должен быть неукоснительно соблюдаем при каждом инциденте. Пропуск даже нескольких значимых случаев может исказить общую картину и сделать анализ нерепрезентативным.

3. Ограничения функциональности и анализа:

– Реактивный, а не проактивный подход, т.к. экспертная система активируется только после возникновения дефекта. Она не предсказывает проблемы, а лишь анализирует уже случившиеся.

– Сложность установления причинно-следственных связей, т.к. не все зависимости в производстве являются линейными и очевидными. Экспертная система может успешно фиксировать корреляции (например, "сбой случился в смену Y"), но для выявления глубинных причин (почему именно в смену Y?) все равно может потребоваться глубокий экспертный анализ.

– Игнорирование успешного опыта, т.к. экспертная система фокусируется на дефектах и сбоях, но не собирает данные об успешных настройках и оптимальных режимах работы, которые также являются ценным знанием.

4. Организационные и технические риски:

– Фрагментарность картины. Если экспертная система не интегрирована с другими источниками данных на предприятии (например, с системами ERP, MES, данными с датчиков IoT), анализ будет неполным. Связь "время события" с другими параметрами может оказаться недостаточной для комплексного понимания ситуации.

– Затратность без гарантированной окупаемости. Разработка, внедрение и поддержка такой системы требуют инвестиций. Эффект от нее может проявиться не сразу, и его может быть сложно количественно измерить, что создает риски для проекта.

Используемая на машиностроительных предприятиях экспертная система, представленная на рисунке 1, – это важный шаг от хаотичного опыта к систематизированному знанию. Однако его эффективность напрямую зависит от качества и дисциплины ручного ввода данных, а также от способности компании интегрировать эти данные в более широкий контекст управления производством. Без решения этих проблем экспертная система рискует стать еще одним "складом" малополезной информации, а не реальным инструментом для принятия решений.

2. Разработка прототипа ССЭЗ

Предлагаемый подход модифицирует описанную выше экспертную систему (рис. 1), интегрируя сбор знаний в ежедневную работу специалистов. Цель – сделать этот процесс систематическим, но ненавязчивым, чтобы он не воспринимался как дополнительная обязанность. Это достигается за счёт встроенных функций автоматического сбора данных в привычные для пользователей рабочие интерфейсы.

Этап 1. Идентификация и характеристика пользователей.

Успешный интерфейс должен не только отображать информацию, но и позволять системному оператору легко вводить, получать и использовать её. Поэтому интерфейс для сбора знаний должен быть строго адаптирован под нужды разных групп пользователей. В рамках кейса были выделены три ключевых типа:

1. Операторы линии:

- Основные пользователи и главные поставщики знаний.
- Выступают как «входные» поставщики – генерируют знания при использовании системы, но обычно не являются их конечными потребителями. Фиксируют в системе базовую информацию об остановках оборудования и выполненных корректирующих действиях.

2. Руководители групп:

- Поставщики входных данных и постоянные потребители выходной информации.
- Обладают более глубокими знаниями о процессе, чем операторы. Их задача – курировать операторов и помогать в решении сложных или незадокументированных проблем, выступая для них в роли «живой» базы знаний. Как потребители, они используют систему для формирования еженедельных отчётов о качестве для операторов.

3. Инженеры по качеству

- Эпизодические пользователи, только получающие информацию.
- Их работа с системой не привязана к ежедневному процессу. Главный интерес – получать знания в формате, пригодном для сравнительного анализа с данными измерений. Их цели – исследование причин повторяющихся проблем и разработка долгосрочных производственных и сервисных стратегий.

Определение линейных операторов в качестве ключевых пользователей напрямую влияет на выбор стиля интерфейса. Для данной категории персонала оптимальным решением является интуитивный графический интерфейс, например, с использованием элементов выбора (флажков). Такой подход позволяет пользователю напрямую ассоциировать элементы интерфейса с реальными физическими объектами и процессами. Текстовый же интерфейс, напротив, может вызвать затруднения в восприятии и потребует повышенной концентрации внимания.

Этап 2. Определение модели процесса.

Следующим шагом после идентификации пользователей является формализация модели процесса. Её цель – не описать саму технологию (это должно быть сделано ранее), а определить точки взаимодействия между процессом и источниками знаний. То есть, необходимо задать: какие данные могут быть собраны в ходе работы (отслеживаемая информация) и какие воздействия на процесс осуществляются (корректирующие действия).

Этап содержит следующие факторы:

- Отслеживаемая информация. В рамках эксперимента отслеживались шесть параметров, касающихся размеров и спецификаций машиностроительной продукции. Помимо этого, источником данных является визуальный контроль оператора на производственной линии. Хотя эту информацию сложно формализовать, в данном случае ею можно пренебречь, так как инструментальные измерения обладают более высоким разрешением. Мониторинговой системой не будет упущена ни одна существенная проблема, которую мог бы заметить оператор.

- Корректирующие действия. Мониторинг процесса предоставляет входную информацию, а реакция операторов на нештатные ситуации формирует выходную – в виде настроек оборудования и ремонтных работ.

Анализ показал, что значительная часть мониторинга по-прежнему остается на усмотрение оператора, что указывает на необходимость дальнейшей работы по стандартизации этих понятий.

Этап 3. Разработка обобщенной модели сбоев для машиностроительного производства.

На основе процессной модели формируется обобщенная модель сбоев. Её задача – установить причинно-следственные связи между входной и выходной информацией. Для этой работы эффективно применение таких инструментов, как деревья отказов или анализ видов и последствий отказов (FMEA).

Важно отметить, что детализация модели возможна лишь после сопоставления собранных знаний с объективными данными измерений (рис. 1). Конечная цель – не создание исчерпывающей базы данных/знаний всех возможных неисправностей, а формирование общих принципов для проектирования интерфейса.

При этом нет необходимости разрабатывать всё с нуля. Если какие-либо типовые сбои уже известны и задокументированы, они должны быть напрямую интегрированы в интерфейс. Это решение преследует две цели: создание

привычной и понятной среды для пользователя и значительное упрощение процедуры сбора знаний, обеспечивая их переносимость между системами.

Этап 4. Проектирование прототипа интерфейса.

На основе проведённого анализа были сформулированы ключевые принципы для разработки прототипа интерфейса, предназначенного для сбора знаний и планируемого к тестированию на производстве.

Основные проектные решения включают:

1. Графический интерфейс. Учёт определённых типов пользователей указывает на необходимость графического интерфейса, который обеспечит интуитивно понятную связь с производственной системой и её глубокую интеграцию в рабочий процесс.

2. Сквозная запись данных. Для последующего построения детализированной модели сбоя требуется сбор всех параметров процессной модели. Это обуславливает необходимость постоянной фиксации всей входной информации и всех выходных действий с привязкой к хронологии и уникальному номеру инцидента.

3. Автоматизация и стандартизация. Хотя известные ошибки должны быть заранее заложены в систему, интерфейс должен позволять фиксировать и любые другие инциденты. Это требование делает обязательной автоматическую запись всей информации в стандартизированном формате.

Принцип работы спроектированного авторами прототипа ССЭЗ. Разработанный прототип Системы Сбора Экспертных Знаний (ССЭЗ) функционирует по следующему алгоритму:

I. При остановке оборудования оператор должен нажать соответствующую кнопку в интерфейсе до начала диагностики. ССЭЗ автоматически создаёт новую запись в базе данных с меткой даты и времени и переходит в режим ожидания данных о возникшей неисправности.

II. Последующие диалоговые окна поэтапно проводят оператора через процесс фиксации информации:

1. Локализация сбоя. На первом шаге оператор определяет место возникновения неисправности. Для этого ему предоставляются схематические изображения изделия и элементы выбора (флажки), соответствующие различным станциям производственной линии. Такой подход позволяет простым способом идентифицировать проблемную зону и сузить круг потенциальных причин.

2. Описание характера неисправности. На втором шаге оператор классифицирует тип дефекта. ССЭЗ предлагает список известных и заранее занесённых неисправностей. Поскольку данный перечень не является исчерпывающим, у оператора есть возможность оставить дополнительные комментарии в свободной форме.

3. Условия испытаний и выявленные проблемы прототипа ССЭЗ

Прототип ССЭЗ был развернут на производственной площадке и проходил испытания в течение двух недель. За этот период были зафиксированы все остановки оборудования, что составило 184 инцидента. Данные по остановкам были сопоставлены с более чем 400000 строк информации, собранной с датчиков и систем мониторинга за тот же период. Анализ этой информации был дополнен

обратной связью от операторов о работе с интерфейсом. Как и ожидалось, сам факт поступления такой обратной связи указал на необходимость доработки отдельных элементов системы.

По итогам тестирования были выявлены четыре категории проблем, каждая из которых потребовала изменений в ССЭЗ:

1. Неправильное понимание задачи. Первоначальный интерфейс ССЭЗ вводил операторов в заблуждение относительно задачи локализации дефекта. Анализ комментариев и собранных данных показал, что вместо указания места неисправности операторы часто фиксировали сам факт её обнаружения. Проблема была решена за счет улучшения дизайна интерфейса ССЭЗ и предоставления более четких инструкций. Эффективность любых улучшений в этой области ограничена уровнем вовлеченности пользователей и их пониманием конечной цели задачи.

2. Неожиданные ситуации. Интерфейс ССЭЗ для сбора знаний изначально проектируется под конкретные, прогнозируемые случаи. Даже в адаптивных системах интерфейс часто является наименее гибким компонентом, поэтому его неспособность обрабатывать непредвиденные ситуации закономерна. В данном кейсе это проявилось при регистрации сбоев, связанных с нефункциональными частями продукта, которые, по предположениям, не влияли на контролируемые параметры.

3. Ожидаемые ситуации без референсов. В отличие от предыдущей категории, эти проблемы представляют собой пробелы в исходной модели сбоев, использованной при проектировании. Анализ данных позволил выявить новые, неучтенные ранее шаблоны неисправностей, которые приводили к остановкам оборудования.

4. Недостаток мотивации. Статистика использования системы выявила проблему мотивации: из 184 зафиксированных остановок только 73 были прокомментированы операторами. Для решения этой проблемы было предложено внедрить в программное обеспечение функции, стимулирующие пользователей к более систематическому взаимодействию с системой, особенно в ночные смены.

4. Заключение

Несмотря на трудоемкость, процесс итеративного прототипирования ССЭЗ доказал свою ценность, позволив выявить проблемы, которые могли бы остаться незамеченными для разработчиков. Все обнаруженные недостатки могут быть устранены при создании более полной версии системы сбора экспертных знаний.

Список литературы

1. Fernando J., Baldeovar M. (2022). Decision Support System: Overview, Different Types and Elements // *Technoarete Transactions on Intelligent Data Mining and Knowledge Discovery*. 2022, vol. 2, iss. 2, pp. 13-18. DOI: 10.36647/TTIDMKD/02.02.A003.
2. Стельмаков В.А., Гимадеев М.Р., Никитенко А.В., Улисков М.В. Мультиагентная система поддержки принятия технологических решений при чистовой обработке отверстий фрезерованием на обрабатывающих центрах с ЧПУ // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2025. – Т. 21, №1(241). – С. 19-26. – DOI: 10.36652/1813-1336-2025-21-1-19-26.
3. Чечнев В.Б. Использование систем поддержки принятия решений в автоматизации процессов принятия решений // *Электронные библиотеки*. – 2025. – Т. 28, №1. – С. 163-183. – DOI: 10.26907/1562-5419-2025-28-1-163-183.

4. Щербаков М.В., Задиран К.С., Волкова Д.А. Фреймворк для автоматизации прогнозирования остаточного ресурса оборудования при построении проактивных систем поддержки принятия решений // Программные продукты и системы. – 2025. – № 1. – С. 100-107. – DOI: 10.15827/0236-235X.149.100-107.
5. Белозеров М.В., Лейзгольд К.А., Бачурин А.А., Бочкарев С.В. Подготовка данных для системы поддержки принятия решений по управлению техническим обслуживанием и ремонтами нефтяного оборудования // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2025. – Т. 1. – С. 234-240.

Сведения об авторах:

Ерохин Виктор Викторович – д.т.н., доцент, профессор кафедры математических методов и бизнес-информатики МГИМО МИД РФ, профессор кафедры инновационного предпринимательства МГТУ им. Н.Э. Баумана;

Ши Хан – аспирант.