

УДК 667.64:678.02

DOI 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-35-45

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКОЙ

*О. В. Паливода, Ю. А. Лебеденко*

*Херсонський національний технічний університет, 73008, м. Херсон Бериславське шосе, 24; e-mail: pov81@ukr.net, lebedenko@kntu.net.ua*

Зазначено труднощі автоматизації управління, які пов'язані з варіабельністю вхідних параметрів і складністю математичного опису внутрішніх динамічних процесів в контрольованому об'єкті. Сформульовано і позначено особливості категоріальних понять автоматизації управління акустико-емісійної діагностикою: об'єкта управління, системи управління, функцій управління. Представлено математичний формалізм моделювання енергетичного спектра сигналів акустичної емісії. Використано дискретний і континуальний підхід до опису осциляторних властивостей внутрішньої структури матеріалу під навантаженням. Запропоновано структурну модель основних етапів управління, що включає багатовимірну вхідну інформацію діагностування, забезпечення контролепридатності виробів, інформатизацію діагностичних параметрів, безпосередні вимірювання, ідентифікацію поточного стану об'єкта. Визначено функціональні призначення системи акустико-емісійної діагностики. На підставі узагальнення відомостей про експериментальні дослідження впливу напружень при одноосьовому навантаженні і чотирихточковому вигині на параметри сигналів акустичної емісії досліджено і систематизовано дані про вплив процесів деформації на інформаційні параметри АЕ сталей і композиційних матеріалів. Встановлено області їх застосування та раціонального використання. Відзначено, що більшість експериментальних робіт у вітчизняній і зарубіжній практиці присвячено впливу на матеріал одного виду деформаційних вимірювань структури матеріалів, в той час як при експлуатації конструкцій матеріал піддається комплексному впливу складних навантажень. Розроблено алгоритм ідентифікації систем автоматичного управління акустико-емісійної діагностики, що відрізняється урахуванням різноманіття факторів, що впливають на вихідні змінні, складністю їх взаємодій і оцінок з використанням експертного оцінювання, системного аналізу та імітаційного моделювання.

**Ключові слова:** автоматизація, діагностика, управління, акустична емісія.

Отмечено трудности автоматизации управления, связанные с вариабельностью входных параметров и сложностью математического описания внутренних динамических процессов в контролируемом объекте. Сформулированы и обозначены особенности категориальных понятий автоматизации управления акустико-эмиссионной диагностикой: объекта управления, системы управления, функции управления. Представлены математический формализм моделирования энергетического спектра сигналов акустической эмиссии. Используются дискретный и континуальный подход к описанию осцилляторных свойств внутренней структуры материала под нагрузкой. Предложена структурная модель основных этапов управления, включая многомерную входную информацию диагностирования, обеспечение контролепригодности изделий, информатизации диагностических параметров, непосредственные измерения, идентификацию текущего состояния объекта. Определены функциональные назначения системы акустико-эмиссионной диагностики. На основании обобщения сведений об экспериментальных исследованиях влияния напряжений при одноосевой нагрузке и четырехточечном изгибе на параметры сигналов акустической эмиссии исследованы и систематизированы данные о влиянии процессов деформации на информационные параметры АЭ сталей и композиционных материалов. Установлены области их применения и рационального использования. Отмечено, что большинство экспериментальных работ в отечественной и зарубежной практике посвящено воздействию на материал одного вида деформационных измерений структуры материалов, в то время как при эксплуатации конструкций материал подвергается комплексному воздействию сложных нагрузок. Разработан алгоритм идентификации систем автоматического управления акустико-эмиссионной диагностики, отличающийся учетом многообразия факторов, влияющих на выходные переменные, сложностью их взаимодействий и оценок с использованием экспертной оценки, системного анализа и имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** автоматизация, диагностика, управление, акустическая эмиссия.

The difficulties of automation control, which are connected with variability of input parameters and complexity of mathematical description of internal dynamic processes in the controlled object, are noted. The features of categorical concepts of automation of control of acoustic-emission diagnostics control are formulated and marked: control object, control system, control functions. The mathematical formalism of modeling the energy spectrum of acoustic emission signals is presented. A discrete and continuous approach to describing the oscillatory properties of the internal structure of a material under load is used. The structural model of the basic stages of management is offered, which includes multidimensional input of diagnostics information, ensuring the controllability of products, informatization of diagnostic parameters, direct measurements, identification of the current state of the object. Functional purposes of the acoustic emission diagnostics system have been determined. On the basis of generalization of information on experimental studies of the effect of stresses under uniaxial loading and four-point bending on the parameters of acoustic emission signals, data on the influence of deformation processes on the information parameters of AE steels and composite materials were investigated and systematized. Areas of their application and rational use are established. It is noted that most of the experimental works in domestic and foreign practice are devoted to the influence on the material of one type of deformation measurements of the structure of materials, while during the operation of structures the material is subjected to a complex effect of complex loads. An algorithm for identification of systems for automatic control of acoustic emission diagnostics has been developed, which differs taking into account the variety of factors affecting the initial variables, the complexity of their interactions and estimates using expert evaluation, system analysis and simulation modeling.

**Keywords:** automation, diagnostics, control, acoustic emission.

**Вступ.** Метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации волн напряжений при изменениях структуры материалов, является в настоящее время наиболее перспективным средством мониторинга ответственных производственных объектов.

Управление системой акустико-эмиссионной диагностики определяется путем поиска новых информативных параметров и разработки методических приемов изучения явления акустической эмиссии. Оценка качества объектов контроля производится путем выявления в материале акустически активных зон или локальных групп АЭ – источников с высокой степенью их опасности.

Наиболее сложным моментом изучения изменений структуры материалов под нагрузкой является идентификация акустических сигналов и определение механических свойств материалов в источнике инициирования АЭ. Тесная связь между процессами разрушения и наличием АЭ позволяет при помощи регистрации АЭ сигналов определять степень приближения состояния материала к разрушению. Решение этих задач на современном этапе развития средств технической диагностики требует обязательного использования информационных технологий, компьютерных программ и интеллектуальных ресурсов.

**Анализ современных зарубежных и отечественных публикации по обозначенной**

**проблеме** обнаруживает постоянный интерес к автоматизации систем акустико-эмиссионной диагностики конструкций. Вопросы автоматизации управления потенциально опасных объектов, работающих под влиянием изменяющихся условий эксплуатации, отражены в работах [1-4]. Создание методологических основ автоматизации и алгоритмов функционирования систем управления отражено в работах [5-7], исследование и закономерностей повышения эффективности систем технической диагностики отражено в работах [8-10]. Методы и методики, используемые большинством авторов, имеют ряд ограничений, так как предназначены для решения частных вопросов автоматизации и не учитывают большого разнообразия параметров и условий, которые имеют место при эксплуатации оборудования. Неопределённость и неточность в определении условий эксплуатации резко усложняет возможности автоматического управления акустико-эмиссионной диагностикой.

К нерешенным задачам общей проблемы идентификации систем автоматического управления акустико-эмиссионной диагностики относятся построение структурной модели этапов управления и алгоритма ее функционирования с учетом сложных взаимосвязей между информационными параметрами.

Целью работы является выявление особенностей автоматического управления акустико-эмиссионной диагностикой сложных производственных объектов.

#### Изложение основного материала.

Трудность автоматизации управления акустико-эмиссионной диагностикой определяется большим многообразием задач и определяющих признаков. Наиболее очевидной интерпретацией категориальных понятий автоматизации управления акустико-эмиссионной диагностикой является объект управления, включающий структурные модели, методики идентификации, программное и математическое обеспечение и система управления которая осуществляет непосредственное измерение, прогнозирование, экстраполяцию, поддержку принятия решений и распознавание полезных сигналов на фоне шумов.

В функции управляющей системы входят идентификация состояния объекта управления, разработка методологических принципов сбора и обработки информации, реализация аппаратного и программного обеспечения. Применительно к автоматизированному управлению акустико-эмиссионной диагностикой в эти функции входят дополнительно – выделение полезного сигнала на фоне шумов при нагружении производственных объектов и распознавание образов дефектной структуры материала.

Автоматизированная система управления традиционно базируется на принципах сохранения неизменными известных параметров

$$L = \frac{1}{2} \sum m_j \dot{w}^2(n, j) - \frac{1}{2} \sum w(n, j) \Phi(n - n', j, j') w(n', j') + \sum f(n, j) w(n, j). \quad (2)$$

где  $n$  – номер ячейки,  $m_j (j = 1, 2)$  – масса частиц в ячейке,  $w(n, j)$  – смещение частиц  $j$  в ячейке  $n$ ,  $\Phi(n - n', j, j')$  – силовые константы,  $f(n, j)$  – внешняя сила, которая определяет возникновение вибрационных сигналов.

Физический смысл модели, становится ясным, если перейти к новым переменным:

- смещение центра масс ячейки:

$$u(n) = \frac{1}{m} [m_1 \omega(n, 1) + m_2 \omega(n, 2)], \quad (3)$$

- относительное смещение частиц в ячейке:

динамических процессов и взаимодействий между ними, что отражается в математических моделях и соответствующих коэффициентах. При высокой стабильности и незначительной интенсивности динамических процессов управление ограничивается линейным приближением. Однако, при автоматизированном управлении акустико-эмиссионной диагностической системой приходится сталкиваться с вариабельностью входных параметров. Причины возникновения источников АЭ аналитически представляются в виде дискретных моделей изменений микроструктуры материала под нагрузкой и континуальных моделей распространения акустических волн [11].

Моделирование энергетического спектра АЭ сложной структуры предполагает выделение в массиве контролируемой среды структурной ячейки, отображающей основные черты поведения материала. Каждая частица имеет три степени свободы: смещение центра масс частицы по осям  $x$  и  $y$  и ее поворот.

В [12] выражение для потенциальной энергии приходящейся на одну ячейку, имеет вид:

$$U_n = \frac{1}{2} (K_1 \Delta u_n^2 + K_2 \Delta w_n^2 + K_3 l^2 \Delta \varphi_n^2) \quad (1)$$

где  $u_n, w_n$  – трансляционные степени свободы,  $\varphi_n$  – ротационная степень свободы.

В [13] показано что уравнения движения ячейки являются уравнениями Эйлера для уравнения Лагранжиана.

$$\eta(n) = \frac{m_1 \xi_1 \omega(n, 1) + m_2 \xi_2 \omega(n, 2)}{I}, \quad (4)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – массы атомов в ячейке,  $I$  – момент инерции ячейки, а  $\xi_1$  и  $\xi_2$  – координаты частиц в ячейке относительно координаты центра масс.

Обозначив через  $q(n)$  и  $\mu(n)$  обобщенные силы, соответствующие  $u(n)$  и  $\eta(n)$ , имеем уравнения движения всей ячейки в среде, инициирующей распространение акустического сигнала:

$$m\ddot{u}(n) + \sum_{n'} \Phi^{00}(n-n')u(n') + \sum_{n'} \Phi^{01}(n-n')\eta(n') = q(n) \quad (5)$$

$$I\ddot{\eta}(n) + \sum_{n'} \Phi^{10}(n-n')u(n') + \sum_{n'} \Phi^{11}(n-n')\eta(n') = \mu(n) \quad (6)$$

В случае, когда радиус дальности действия упругих волн много больше размеров ячейки, можно перейти от дискретной к континуальной модели.

Сложность математического описания и анализа внутренних динамических процессов в эксплуатируемом объекте определяет проблему развития технической диагностики. Практически это проявляется в разнообразии входных параметров АЭ, соответствующих разным типам деформации под нагрузкой и их оптимизации, исходя из информативности параметров для каждого вида нагружения, дискретностью или непрерывностью АЭ сигналов. Поэтому автоматизированные системы управления, принцип действия которых основан на поддержании постоянства параметров управления, оказываются малоэффективными для управления сложными акустико-эмиссионными системами с активными детерминированными входными сигналами.

Моделирование сложных систем на основе взаимодействий с комплексом диагностических параметров, необходимо для познания структуры и свойств контролируемых объектов и разработки управляющих воздействий на соответствие нормативным значениям, определения остаточного ресурса и норм допустимых дефектов.

Большое разнообразие измеряемых параметров АЭ усложняет выбор наиболее информативных из них, поэтому представляется целесообразным провести обобщение и систематизацию сведений о влиянии процессов деформации на информационные параметры материалов под нагрузкой.

В таблице 1 представлена систематизация пригодности информационных параметров АЭ при одноосном нагружении и изгибе, составленная на основе обобщения экспериментальных данных с указанием причин неоднозначности их использования.

**Таблица 1 – Информационные параметры АЭ при различных видах нагружения**

Информационные параметры АЭ	Виды нагружения		
	Одноосное растяжение	Четырехточечный изгиб	
	сталь [14-18]	сталь [19,20]	композит [21,22]
Общее число импульсов	рекомендуется	нет сведений	нет сведений
Интенсивность импульсов	рекомендуется	нет сведений	нет сведений
Пиковая амплитуда	нет сведений	рекомендуется	рекомендуется
Плотность АЭ сигнала	нет сведений	качественные оценки	нет сведений
Амплитудно-временное распределение	затруднения в идентификации	неоднозначность результатов	нет сведений
Амплитудно-частотное распределение	нет зависимости от времени	нечеткость зависимости от нагрузки	наличие значительных осцилляций для узкополосных АЭ датчиков
Энергетический спектр	нет сведений	рекомендуется	затруднения в идентификации для широкополосных АЭ датчиков

Как следует из таблицы 1, при ее рассмотрении наблюдается неоднозначность приоритетов использования характеристик

материалов в различных видах силового воздействия. Следует отметить, что большинство работ, касающихся воздействия на

материал с фиксацией сигналов АЭ, посвящено одному виду деформационных изменений структуры, в то время как при эксплуатации конструкции материал подвергается воздействию знакопеременных, тепловых, радиационных и других сложных нагрузок. Отмеченные аспекты диагностирования требуют использования новой методологии, основанной на комплексном применении характеристик АЭ сигналов со всеми присущими особенностями.

В основу методологии автоматизированного управления акустико-эмиссионной диагностикой должна быть положена формализация управленческих решений представленная в виде процедур, обладающих внутренней организацией структурой и иерархией. Процедура управления считается формализованной, если определена и однозначно представлена последовательность элементарных актов ее реализации. Формализация управленческих решений предполагает возможность многократного повторения операций для некоторого множества исходных данных.

Предлагается создание специальной структуризации блоков построения основных этапов управления акустико-эмиссионной диагностикой (рис.1).

На первом этапе модели управления акустико-эмиссионной диагностикой формируется набор возможных характеристик, связанных с изменением прочностных свойств материалов. Учитываются силовые воздействия на материал, связанные с изменением условий эксплуатации, диапазон их отклонений от технических условий, сведения о возможных структурных превращениях и причинно-следственные связи с диагностическими параметрами. Все это определяет входную информацию диагностирования.

На втором этапе модели производится анализ и конкретизация объектов контроля, выбор из всего множества элементов оборудования эксплуатируемого в условиях нагружения наиболее опасного с точки зрения влияния на функционирование всей системы в целом. Определяются условия контроля, места для установки датчиков, качество контролируемой поверхности, доступ к

измерениям. Это определяет контролепригодность продукции.

На третьем этапе определяются информативные признаки АЭ диагностики, устанавливаются диагностические параметры сигналов АЭ, пороги выявления дефектов, согласуются нормы допустимых дефектов.

На следующем этапе выполняется непосредственное измерение диагностических параметров органолептическими методами, с использованием органов чувств, инструментальными методами с замерами отклонений геометрических параметров, активных методов неразрушающего контроля, связанных с возбуждением и регистрацией тепловых, магнитных, ультразвуковых полей, рентгеновских и проникающих излучений и пассивных методов АЭ диагностики.

Далее производится оценка текущего состояния конструкции, включающая оценку степени опасности выявленного дефекта, определение уровня его развития, принятие заключения о результатах комплексных испытаний, определение остаточного ресурса.

Последний этап структурной модели основных этапов управления акустико-эмиссионной диагностикой посвящается определению функциональных назначений АЭ диагностики в решении конкретных производственных задач выявления дефектов, непрерывном наблюдении и контроле, диагностике состояний, периодическому наблюдению и диагностированию.

Диагностика дефектности затруднена необходимостью обработки и идентификации больших потоков акустических импульсов в том числе помех.

В настоящее время наметилось две группы идентификации систем автоматического управления акустико-эмиссионной диагностикой:

– автоматизация измерений, заключающаяся в регистрации волновой формы АЭ сигналов и вычислении большого числа ее параметров;

– автоматизация обработки результатов измерений, заключающаяся в аппаратных обработках АЭ сигналов, методах моделирования и идентификации.

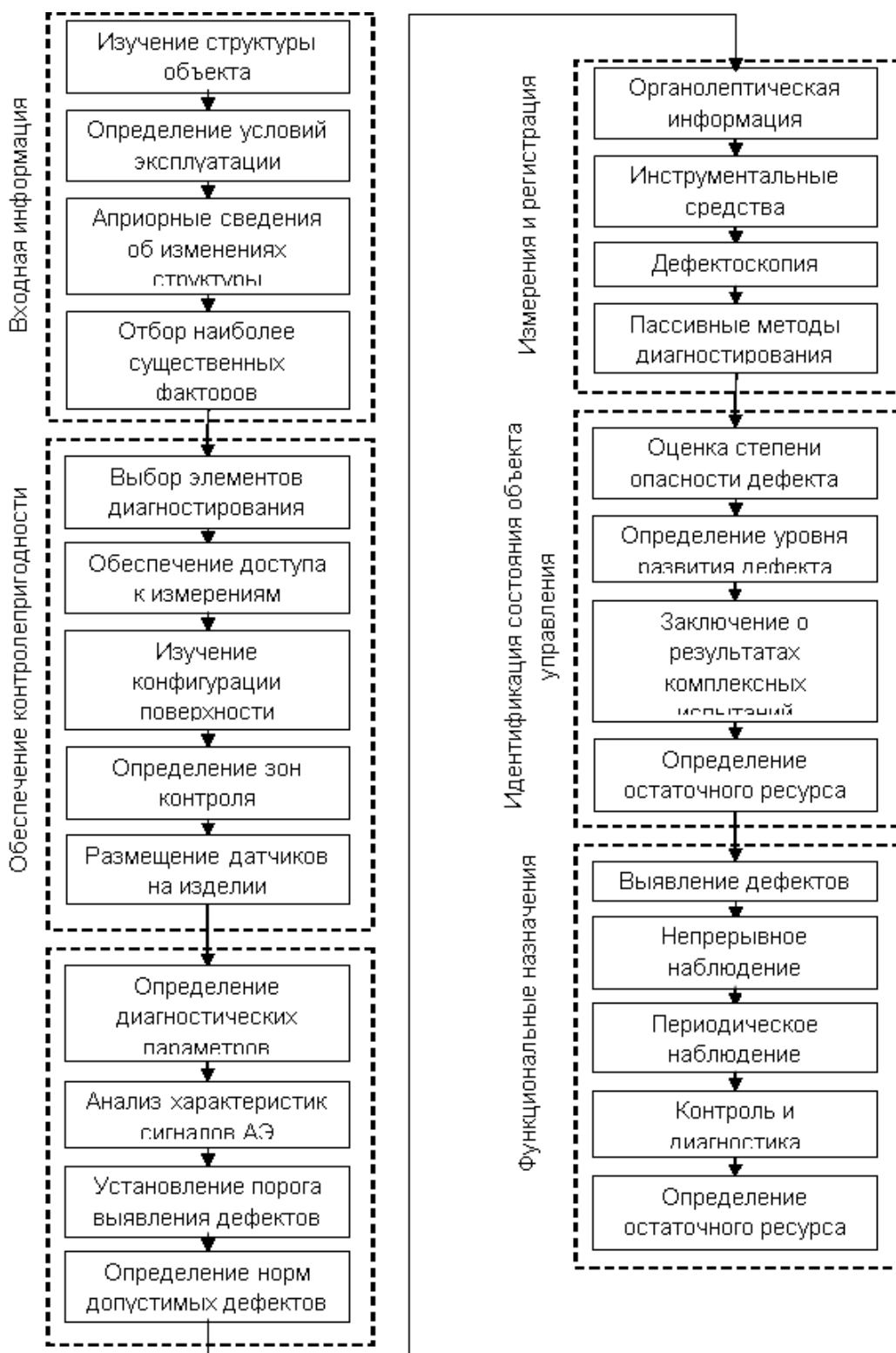


Рисунок 1 – Структурная модель основных этапов управления акустико-эмиссионной диагностикой

В состав перспективных систем управления, которые обеспечивают устойчивое управление акустико-эмиссионной диагностикой, должны

входить подсистемы идентификации и прогнозирования структурных состояний материала в объекте управления. Такие системы разрабатывают, используя методы искусственного интеллекта, методы поддержки решений и теорию информации.

Прогнозирование изменений структурных состояний материала в дефектных зонах наблюдений базируется на основе существующей априорной информации и выборе соответствующей модели долгосрочного либо краткосрочного прогнозирования. Если интервал прогнозирования небольшой рассматривается физическая модель изменений структуры материала при силовых воздействиях. Если же интервал прогнозирования значительный к используемой физической модели структуры следует добавить вероятностные оценки возможных изменений эксплуатационных факторов.

Конкретные алгоритмы функционирования системы управления создаются с учетом прогнозов результатов влияния различных трудно учитываемых факторов на выходные параметры системы. Многообразие факторов, влияющих на выходные параметры системы управления и сложные взаимосвязи между информационными параметрами АЭ, послужили обоснованием создания специального алгоритма идентификации систем автоматического управления акустико-эмиссионной диагностикой (рис.2).

Алгоритм основан на декомпозиции целевой функции на ряд локальных целей, этапов их достижения, выборе акустических характеристик, чувствительных к процессам деградации структуры исследуемых материалов, их измерению и оценкам с использованием экспертных заключений, системного анализа и имитационного моделирования. Разработанный алгоритм может быть использован при создании АЭ аппаратуры и программного обеспечения.

Автоматизация управления технической диагностикой позволяет существенно повысить надежность и безотказность работы оборудования за счет выполнения требований к качеству диагностирования, стабильности и воспроизводимости результатов. Это может быть достигнуто лишь при одновременном использовании методов дефектации, основанных на измерениях отклонений контролируемых параметров от нормативных значений и методов неразрушающего контроля, включающих кроме измерений физических характеристик так же и выборочные разрывные испытания. Обработка результатов таких комплексных измерений с выдачей практических рекомендаций по корректировке условий эксплуатации и определению остаточного ресурса оборудования составляет сущность автоматизированного управления акустико-эмиссионной диагностики.

#### **Выводы**

Доказана возможность идентификации источника АЭ и стадий деградации структуры материала на основе анализа информационных параметров АЭ при различных стадиях нагружения. Обоснован выбор параметров сигналов АЭ, который используется для принятия решающих правил АЭ диагностики.

Усовершенствована идентификация процедуры определения источника АЭ, которая достигается за счет переноса основной части обработки информации из аппаратурной части АЭ системы в область методологического и программного обеспечения.

Существенное повышение точности результатов определения дефектной структуры при сложных видах деформации обеспечивается измерением нескольких разнородных информационных параметров сигналов АЭ с использованием многоуровневого алгоритма управления.

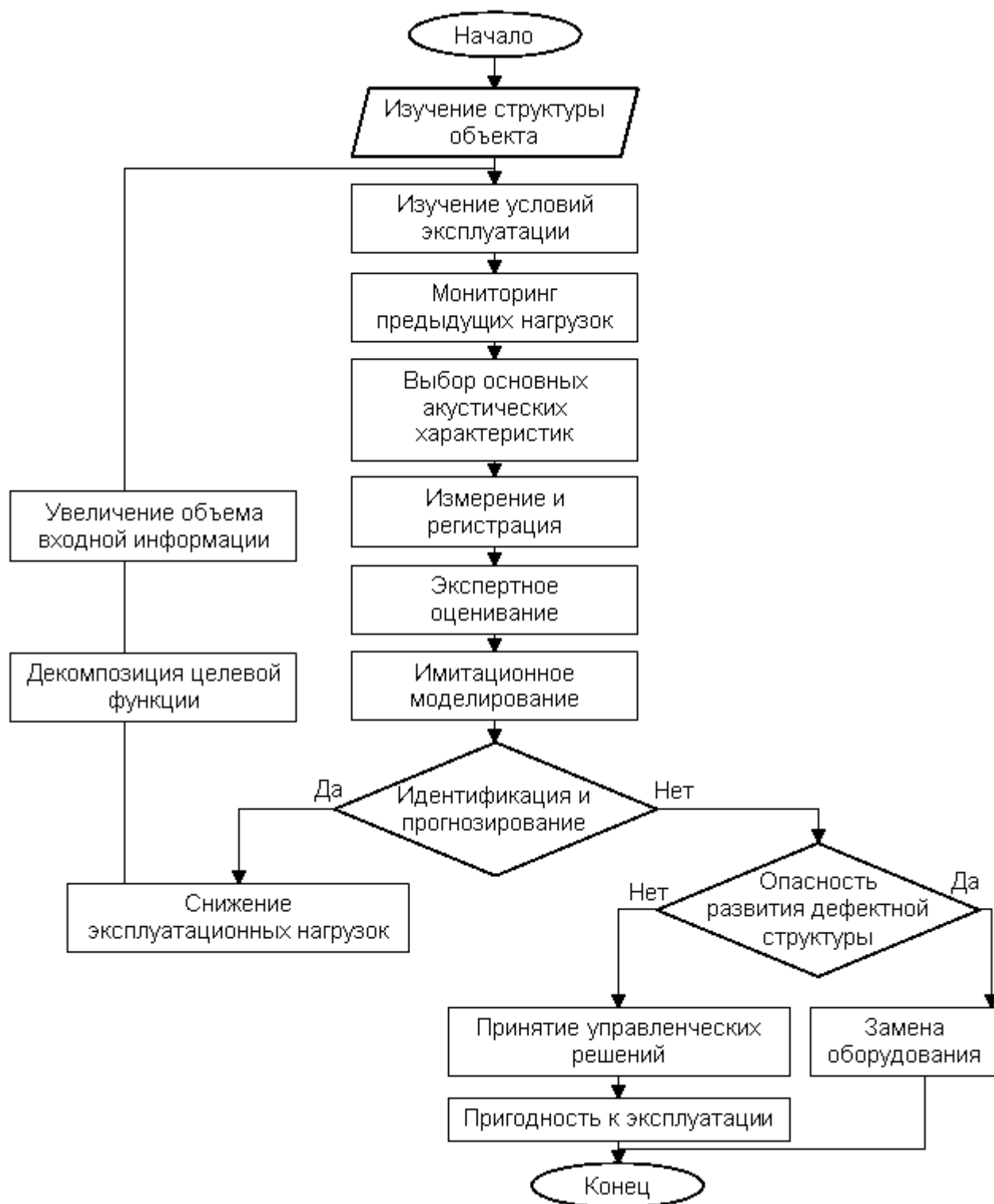


Рисунок 2 – Алгоритм идентификации системы автоматического управления акустико-эмиссионной диагностики



Дальнейшее повышение точности и достоверности диагностики может быть достигнуто рациональным использованием совокупности активных и пассивных методов неразрушающего контроля, выборочных разрывных испытаний, спектрального и металлографического анализа, рентгеновской и электронной микроскопии.

#### Список використаних джерел

1. Прахова М.Ю., Хорошавина Е.А., Краснов А.Н., Емец С.В. Система автоматизации в нефтяной промышленности. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 304 с.
2. Омаров К.А., Столстовских И.Н., Кольга А.Д. Автоматизация проектирования систем контроля и технической диагностики конвейерных линий. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2012. №2. С. 67-74.
3. Тарасик В.П., Рынкевич С.А. Проблемы диагностирования автотранспортных средств и пути их решения. *Вестник Белорус-Росс ун-та*. 2007. №1. С. 57-66.
4. Рынкевич С.А. Автоматизация управления и диагностирование гидромеханических передач. *Вестник Белорус-Росс ун-та*. 2009. №1(22). С. 22-29.
5. Баданина В.Л. Алгоритмы автоматизированного формирования детализированных программ диагностических обследований технического состояния паровых котлов теплоэлектростанций. *Вестник Южно-Уральского университета*. 2015. Т.15. №1. С. 113-116.
6. Яковлев А.В., Соснин В.А. Цифровая обработка акустических импульсов в системе акустико-эмиссионной диагностики КАЭМС. *Техническая акустика*. 2018. №3. С.12-18.
7. Дубов А.В. Автоматизация технического диагностирования аналоговых устройств. *Молодой ученый*. 2010. №5(16). С. 18-22.
8. Кузьмин А.Э. Автоматизация диагностики инженерно-технического состояния потенциально опасных объектов на основе комплексирования методов и средств неразрушающего контроля. *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2012. №2. С.57-62.
9. Литвиненко В.І., Лур'є І.А., Боскин О.О. Автоматизація процесів управління акустико-емісійними діагностичними системами *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2020. №1.
10. Sharko A. Models and methods of processing of information of loads of acoustic signals in technical diagnostic systems. *Informatyka, Automatyka, Pomiar*. Politechnika Lubelska, Lublin Polska IAPGOS. 2018. No 3. P. 15-18.
11. Кунин И.А. Теория упругих сред с микроструктурой. Нелокальная теория упругости. М.: Наука, 1982. 424с.
12. Лисина С.А. Континуальные и структурно-феноменологические модели в механике сред с микроструктурой. Автореф. дис. канд. физ-мат. наук. Нижний Новгород, 2009. 20 с.
13. Marasanov V., Sharko A. Mathematical Models for Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signals. V. Marasanov. *International Fronter Science Letters*. 2016. Vol.10. P. 37-44
14. Surace C., Bovsunovsky A. The use of frequency ratios to diagnose structural damage in varying environmental conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. No 106523/ P. 136.
15. Kumar J., Sarmah R., Ananthakrishna G. General framework for acoustic emission during plastic deformation. *Physical Review*. 2015. Vol. 92. P.1441.
16. Папилов И.И., Стоев П.И. Обнаружение и исследование акусто-эмиссионных эффектов при пластической деформации сталей в магнитном поле. *Доповіді Національній академії наук України*. 2014. №1. С. 81-89.
17. Недосека А.Я., Недосека С.А., Маркашева Л.И., Кушнарева У.С., О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2016. №4. С.9-13.
18. Carpinteri A., Lacidogna G., Pugno N. Structural damage diagnostic and lifetime assessment by acoustic emission monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007. №74. P. 273-289.

19. Liu S, Li X, Li Z, Chen P., Yang X., Liu Y., Meas J. Energy distribution and fractal characterization of acoustic emission (AE) during coal deformation and fracturing. *Int Meas Confederation*. 2019.No 136. P.122-131.

20. Алексенко В.Л., Шарко А.А., Сметанкин С.А., Степанчиков Д.М., Юренин К.Ю. Идентификация структурных особенностей механизмов деформирования при изгибе методом акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2019. №1. С. 32-39.

21. Алексенко В.Л., Шарко А.А., Сметанкин С.А., Степанчиков Д.М., Юренин К.Ю. Применение акустико-эмиссионных и тензометрических измерений к процессам диагностики деформационного упрочнения композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы. *Техн. диагностика и неразрушающий контроль*. 2019. №3. С.49-54.

22. Mi, Y., Chen, Z., Wu, D. Acoustic Emission Study of Effect of Fiber Weaving on Properties of Composite Materials IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, 2018-October, art. no. 8579807(2018)

### References

1. Prahova M.Yu., Horoshavina E.A., Krasnov A.N., Emets S.V. Sistema avtomatizatsii v neftyanoy promyshlennosti. M.: Infra-Inzheneriya, 2019. 304 p. [in Russian]

2. Omarov K.A., Stolstovskih I.N., Kolga A.D. Avtomatizatsiya proektirovaniya sistem kontrolya i tehnikeskoy diagnostiki konveyernykh liniy. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2012. No 2. P. 67-74. [in Russian]

3. Tarasik V.P., Rynkevich S.A. Problemy diagnostirovaniya avtotransportnykh sredstv i puti ih resheniya. *Vestnik Belorus-Ross universiteta*. 2007. No 1. P. 57-66. [in Russian]

4. Rynkevich S.A. Avtomatizatsiya upravleniya i diagnostirovanie gidromekhanicheskikh peredach. *Vestnik Belorus-Ross universiteta*. 2009. No1(22). P. 22-29. [in Russian]

5. Badanina V.L. Algoritmy avtomatizirovannogo formirovaniya detalizirovannykh programm diagnosticheskikh obsledovaniy tehnikeskogo sostoyaniya parovykh kotlov teploelektrostantsiy. *Vestnik Yuzhno-*

*Uralskogo universiteta*. 2015. Vol.15. No1. P. 113-116. [in Russian]

6. Yakovlev A.V., Sosnin V.A. Tsifrovaya obrabotka akusticheskikh impulsov v sisteme akustiko-emissionnoy diagnostiki KAEMS. *Tekhnicheskaya akustika*. 2018. No3. P.12-18. [in Russian]

7. Dubov A.V. Avtomatizatsiya tehnikeskogo diagnostirovaniya analogovykh ustroystv. *Molodoy ucheniy*. 2010. No 5(16). P. 18-22. [in Russian]

8. Kuzmin A.E. Avtomatizatsiya diagnostiki inzhenerno-tehnikeskogo sostoyaniya potentsialno opasnykh ob'ektov na osnove kompleksirovaniya metodov i sredstv nerazrushayushego kontrolya. *Sovremennyye tehnologii obespecheniya grazhdanskoy oborony i likvidatsii posledstviy chrezvyichaynykh situatsiy*. 2012. No2. P.57-62. [in Russian]

9. Lytvynenko V.I., Lurie I.A., Boskyn O.O. Avtomatyzatsiya protsesiv upravlinnia akustiko-emissionnykh diaagnostichnykh systemamy *Visnyk Ternopil'skoho natsionalnoho tekhnicheskoho universytetu*. 2020. No1. [in Russian]

10. Sharko A. Models and methods of processing of information of loads of acoustic signals in technical diagnostic systems. *Informatyka, Automatyka, Pomiry*. Politechnika Lubelska, Lublin Polska IAPGOS. 2018. No 3. P. 15-18.

11. Kunin I.A. Teoriya uprugih sred s mikrostrukturoy. Nelokalnaya teoriya uprugosti. M.: Nauka, 1982. 424p. [in Russian]

12. Lisina S.A. Kontinualnyie i strukturno-fenomenologicheskie modeli v mehanike sred s mikrostrukturoy. Avtoref. dis. kand. fiz-mat. nauk. Nizhniy Novgorod, 2009. 20 p. [in Russian]

13. Marasanov V., Sharko A. Mathematical Models for Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signals. V. Marasanov. *International Frontier Science Letters*. 2016. Vol.10. P. 37-44.

14. Surace C., Bovsunovsky A. The use of frequency ratios to diagnose structural damage in varying environmental conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. No 106523. P. 136.

15. Kumar J., Sarmah R., Ananthakrishna G. General framework for acoustic emission during plastic deformation. *Physical Review*. 2015. Vol. 92. P.1441.

16. Papirov I.I., Stoev P.I. Obnaruzhenie i issledovanie akusto-emissionnykh effektov pri plasticheskoy deformatsii staley v magnitnom pole. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2014. No 1. P. 81-89. [in Russian]
17. Nedoseka A.Ya., Nedoseka S.A., Markasheva L.I., Kushnareva U.S., O raspoznavanii izmeneniy struktury materialov pri razrushenii po dannyim akusticheskoy emissii. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*. 2016. No 4. P.9-13. [in Russian]
18. Carpinteri A., Lacidogna G., Pugno N. Structural damage diagnostic and lifetime assessment by acoustic emission monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007. No74. P. 273-289.
19. Liu S, Li X, Li Z, Chen P., Yang X., Liu Y., Meas J. Energy distribution and fractal characterization of acoustic emission (AE) during coal deformation and fracturing. *Int Meas Confederation*. 2019.No 136. P.122-131.
20. Aleksenko V.L., Sharko A.A., Smetankin S.A., Stepanchikov D.M., Yurenin K.Yu. Identifikatsiya strukturnykh osobennostey mekhanizmov deformirovaniya pri izgibe metodom akusticheskoy emissii. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*. 2019. No1. P. 32-39. [in Russian]
21. Aleksenko V.L., Sharko A.A., Smetankin S.A., Stepanchikov D.M., Yurenin K.Yu. Primenenie akustiko-emissionnykh i tenzometricheskikh izmereniy k protsessam diagnostiki deformatsionnogo uprochneniya kompozitsionnykh materialov na osnove epoksidnoy matritsyi. *Tekhn. diagnostika i nerazrushayushchiy. Kontrol*. 2019. No 3. P. 49-54. [in Russian]
22. Mi Y., Chen Z., Wu D. Acoustic Emission Study of Effect of Fiber Weaving on Properties of Composite Materials IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, 2018-October, art. no. 8579807