

Система экспресс-диагностики и планирования ремонтно-восстановительных работ сложного технического объекта на основе интегрального показателя

В. Д. Хиеу, Р. А. Файзрахманов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Аннотация: Задача диагностики технического состояния сложного объекта и планирования ремонтно-восстановительных работ является актуальной в условиях современной экономики. В статье рассматривается подход к решению данной проблемы на основе использования разработанного авторами интегрального показателя «модифицированный индекс технического состояния». Предложена концептуальная модель системы непрерывного (циклического) мониторинга уровня интегрального показателя. Для оценки качества технического состояния объекта введена лингвистическая шкала, с использованием которой формируются рекомендации по выполнению ремонтно-восстановительных работ. Разработана система планирования ремонтно-восстановительных работ в условиях наличия ограничений на ресурсы.

Новизна работы заключается в разработанной методике создания оценочной лингвистической шкалы на основе предложенного интегрального показателя для рассматриваемого класса технических объектов, позволяющей получить качественную оценку состояния объекта и сформировать рекомендации по выполнению ремонтно-восстановительных работ. В работе предложено решение задачи планирования ремонтно-восстановительных работ в условиях наличия ограничений на ресурсы на основе модифицированного индекса технического состояния сложного объекта.

Ключевые слова: экспресс-диагностика, планирование ремонтно-восстановительных работ, интегральный показатель технического состояния, концептуальная модель непрерывного (циклического) мониторинга, оценка уровня технического состояния, оценка качества технического состояния, лингвистическая шкала оценки качества технического состояния.

Введение

Актуальность повышения качества технического обслуживания и ремонта (далее ТОиР) сложного объекта обусловлена необходимостью обеспечения надежности его работы, минимизации эксплуатационных затрат и, как следствие, повышения эффективности производства и конкурентоспособности предприятия [1-3].

Ключевой проблемой, приводящей к низкой эффективности производственного процесса, является чрезмерный простой оборудования в процессе ТОиР, что исключает возможность его использования в

производстве. Согласно статистическим данным, приведенным в исследовании [4], фактическое время, затрачиваемое на ТОиР на некоторых крупных промышленных предприятиях, более чем в два раза превышает нормативные сроки, установленные регламентом.

Практика показывает, что финансовые потери от простоя технического оборудования в течение всего жизненного цикла эксплуатации многократно превышают первоначальные капитальные затраты. Согласно исследованиям выделяют три основные причины, приводящие к высоким затратам на ТОиР. Это неудовлетворительный контроль технического состояния, плохая организация труда на рабочих местах, высокий износ оборудования [5]. При этом третья причина, в определенной степени, является следствием первых двух.

Для эффективного контроля технического состояния оборудования существуют различные подходы, в том числе исследования, основанные на использовании показателя «индекс технического состояния» (далее ИТС) [6-8], методика расчета которого предложена Минэнерго РФ (Постановление Правительства РФ от 19 декабря 2016 г. №1401 «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей»). Однако особенностью данных методов является наличие субъективного фактора, связанного с привлечением экспертов для оценки технического состояния. Это может повлиять на сроки и результаты диагностики технического состояния оборудования, что в конечном итоге может снизить общую эффективность ТОиР.

В данной статье предложена система экспресс-диагностики и планирования ремонтно-восстановительных работ технических объектов на основе разработанного авторами интегрального показателя

«модифицированный индекс технического состояния» (далее ИТСм), описание которого приведено в [9]. Использование данного показателя позволяет получить экспресс-оценку технического состояния сложного объекта без субъективных суждений экспертов, основываясь на фактических параметрах объекта, таких как статистические характеристики рабочих параметров в процессе эксплуатации, графическая модель структуры технического объекта [9,10].

1. Концептуальная модель системы непрерывного (циклического) мониторинга и экспресс-диагностики качества технического состояния сложного объекта на основе интегрального показателя.

Архитектура концептуальной модели системы непрерывного (циклического) мониторинга состояния сложного технического объекта на основе интегрального показателя ИТСм представлена на рис. 1.

Сложный технический объект представлен на схеме состоящим из множества взаимосвязанных узлов, структура которого описывается с помощью графической модели [9,10]. В состав разработанной системы входят компоненты, обеспечивающие расчет интегрального показателя ИТСм в реальном режиме времени, на основе которого определяются остаточный ресурс, ремонтпригодность оборудования, качественная оценка технического состояния и формируются рекомендации по планированию ремонтно-восстановительных работ.

Информационно - измерительная система (ИИС) сбора и предварительной обработки данных, включает измерительные датчики и контроллеры для съема, фиксации, предварительной обработки и передачи данных. Здесь осуществляется сбор информации о контролируемых рабочих параметрах, которые служат для оценки состояния узлов сложного технического объекта.

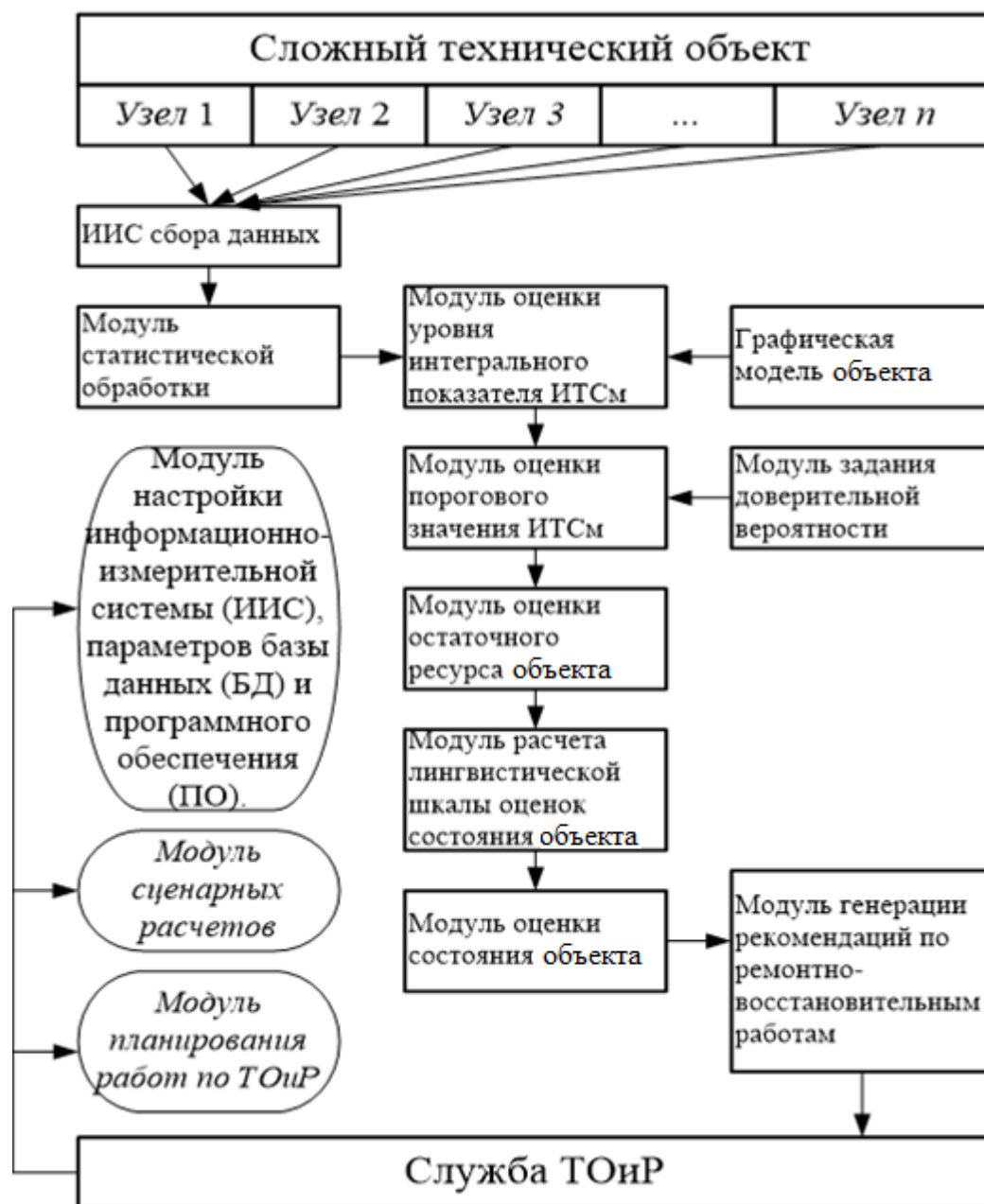


Рис. 1. - Архитектура концептуальной модели системы непрерывного мониторинга состояния технического объекта

Модуль настройки информационно-измерительной системы, параметров базы данных и программного обеспечения. Данный модуль выполняет функции привязки параметров датчиков измерения и интерфейсов контроллеров к информационной базе данных; привязки функциональных узлов и рабочих параметров функциональных узлов к базе данных.

Графическая модель объекта. Описывает топологическую схему и используется для расчёта весов узлов сложного технического объекта и расчета интегрального показателя ИТСм.

Модуль статистической обработки. Выполняет расчет статистических характеристик контролируемых параметров узлов.

Модуль оценки уровня интегрального показателя ИТСм. Выполняется расчет интегрального показателя ИТСм сложного объекта [9].

Модуль оценки порогового значения ИТСм. На основе статистических данных выполняется расчет критического уровня интегрального показателя ИТСм как границы ремонтпригодности объекта [11].

Модуль оценки остаточного ресурса объекта. Остаточный ресурс в единицах интегрального показателя определяется как результат сравнения фактического значения ИТСм с его пороговым значением. Оценка остаточного ресурса времени (или циклов) службы технического объекта определяется в среднем по кривой изменения показателя ИТСм во времени. В частности, анализ динамики ИТСм показал, что для прогноза величин отклонений этого показателя можно использовать полиномиальное уравнение регрессии.

Модуль расчета лингвистической шкалы оценок состояния объекта. Оценка значения ИТСм находится в интервале значений от 0% до 100%, его уровень непосредственно не дает картину качества состояния объекта. Для этого в статье предлагается методика формирования лингвистической шкалы оценок, поскольку для данного типа объектов она индивидуальна.

Модуль оценки состояния объекта. По фактическому значению ИТСм с использованием лингвистической шкалы определяется оценка состояния сложного технического объекта в терминах, понятных специалистам.

Модуль генерации рекомендаций по ремонтно-восстановительным работам. На основе лингвистической оценки состояния сложного технического объекта и базы данных формируются рекомендации по ремонтно-восстановительным работам, которые предлагаются службе ТОиР.

Модуль сценарных расчетов. Формирование различных вариантов сценариев выполнения ТОиР, расчет интегральных показателей параметров, узлов и технического объекта в целом и их визуализация.

Модуль планирования работ по ТОиР. Планирование ремонтно-восстановительных работ. Поддержка принятия решений по выбору рациональных вариантов ремонтно-восстановительных работ в условиях наличия ограничений на ресурсы.

2. Рекомендательная система ремонтно-восстановительных работ на основе введения лингвистической шкалы оценки технического состояния сложного объекта.

Предложены лингвистические значения уровней оценок, соответствующих состояниям оборудования: отличное, хорошее, удовлетворительное, неудовлетворительное, критическое. Согласно методике формирования лингвистической шкалы мягких оценок предлагаются рекомендации по использованию оборудования и его функциональных узлов в соответствии со значениями ИТСм. В частности, методика Минэнерго РФ включают в себя следующие рекомендуемые действия:

- Критическое состояние: вывод из эксплуатации, техническое перевооружение и реконструкция;
 - Неудовлетворительное состояние: дополнительное техническое обслуживание и ремонт, усиленный контроль технического состояния, техническое перевооружение;
 - Удовлетворительное состояние: усиленный контроль технического состояния, капитальный ремонт, реконструкция;
-

- Хорошее состояние: по результатам планового диагностирования;
- Отличное состояние: плановое диагностирование.

В работе предлагается методика создания лингвистической шкалы, которая отличается от предложенной Минэнерго РФ, однако в методических целях базу лингвистических значений и рекомендуемых действий оставим как в методике Минэнерго РФ. Рассмотрим принцип формирования значений мягких оценок сложного технического объекта и создания шкалы лингвистических оценок.

Методика определения порогового значения ИТСм оборудования рассмотрена в работе [11]. Для приведенных в работе данных пороговые значения объектов удовлетворили нормальному закону по критерию Пирсона. Расчеты по другим законам мало отличались от нормального для использованных исходных статистических данных. Согласно методике на основе обработки статистических данных по множеству однотипных объектов определяются: среднее пороговое значение интегрального показателя $\overline{\text{ИТС}}_{\text{п}}$, задающее границу ремонтпригодности; погрешность порогового значения интегрального показателя $\Delta_{\text{ИТСп}}$ при заданной доверительной вероятности. Доверительный интервал для порогового значения ИТСм задается формулой $\overline{\text{ИТС}}_{\text{п}} - \Delta_{\text{ИТСп}} \leq \text{ИТС}_{\text{п}} \leq \overline{\text{ИТС}}_{\text{п}} + \Delta_{\text{ИТСп}}$. На основе расчета среднего порогового значения определяются границы интегрального показателя для лингвистических оценок.

Методика расчета лингвистической шкалы.

1) Техническое состояние сложного технического объекта со значениями ИТСм, попадающими в доверительный интервал, рекомендуется оценивать как неудовлетворительное, так как с заданной доверительной вероятностью объект находится на границе ремонтпригодности, что требует дополнительных контрольных мероприятий.

2) Техническое состояние сложного технического объекта со

значениями ИТСм ниже доверительного интервала, рекомендуется оценивать как критическое, так как это состояние соответствует вероятности ниже, чем вероятность безотказной работы. Эксплуатация такого оборудования нежелательна.

3) Эксплуатация объекта со значениями ИТСм выше доверительного интервала возможно. Этот интервал рекомендуется делить на три части, возможно на три равные части. Тогда величина интервала определяется как $\Delta = (100 - (\overline{\text{ИТС}}_{\text{п}} + \Delta_{\text{ИТСп}})) / 3$.

4) Состоянию объекта "отличное" соответствуют значения ИТСм, находящиеся в интервале $\overline{\text{ИТС}}_{\text{п}} + \Delta_{\text{ИТСп}} + 2\Delta < \text{ИТСм} \leq 100$.

5) Состоянию объекта "хорошее" соответствуют значения ИТСм, находящиеся в интервале $\overline{\text{ИТС}}_{\text{п}} + \Delta_{\text{ИТСп}} + \Delta < \text{ИТСм} \leq \overline{\text{ИТС}}_{\text{п}} + \Delta_{\text{ИТСп}} + 2\Delta$.

6) Состоянию объекта "удовлетворительное" соответствуют значения ИТСм, находящиеся в интервале $\overline{\text{ИТС}}_{\text{п}} + \Delta_{\text{ИТСп}} < \text{ИТСм} \leq \overline{\text{ИТС}}_{\text{п}} + \Delta_{\text{ИТСп}} + \Delta$.

Значения ИТСм и соответствующие лингвистические оценки приведены в таблице 1.

Принцип работы рекомендательной системы основан на создании базы данных рекомендаций при тех или иных значениях лингвистических оценок и предоставлении этих рекомендаций специалистам службы ТОиР в зависимости от значений интегрального показателя технического состояния объекта ИТСм, как показано на рис. 2.

3. Поддержка принятия решений по выбору рациональных вариантов ремонтно-восстановительных работ в условиях наличия ограничений на ресурсы.

Важным остается вопрос о планировании ремонтно-восстановительных работ с использованием предложенного интегрального показателя ИТСм в условиях отсутствия и наличия ограничений на ресурсы.

Таблица № 1

Лингвистическая шкала оценки состояния сложного технического объекта и формирования рекомендаций

Значение ИТС _М	Мягкая оценка состояния сложного объекта	Рекомендации по техническому обслуживанию
$\overline{\text{ИТС}}_{\Pi} + \Delta_{\text{ИТС}\Pi} + 2\Delta < \text{ИТС}_M \leq 100$	отличное	Плановое диагностирование
$\overline{\text{ИТС}}_{\Pi} + \Delta_{\text{ИТС}\Pi} + \Delta < \text{ИТС}_M \leq \overline{\text{ИТС}}_{\Pi} + \Delta_{\text{ИТС}\Pi} + 2\Delta$	хорошее	По результатам планового диагностирования
$\overline{\text{ИТС}}_{\Pi} + \Delta_{\text{ИТС}\Pi} < \text{ИТС}_M \leq \overline{\text{ИТС}}_{\Pi} + \Delta_{\text{ИТС}\Pi} + \Delta$	удовлетворительное	Усиленный контроль технического состояния, капитальный ремонт, реконструкция
$\overline{\text{ИТС}}_{\Pi} - \Delta_{\text{ИТС}\Pi} < \text{ИТС}_M \leq \overline{\text{ИТС}}_{\Pi} + \Delta_{\text{ИТС}\Pi}$	неудовлетворительное	Дополнительное техническое обслуживание и ремонт, усиленный контроль технического состояния, техническое перевооружение
$0 \leq \text{ИТС}_M \leq \overline{\text{ИТС}}_{\Pi} - \Delta_{\text{ИТС}\Pi}$	критическое	Вывод из эксплуатации, техническое перевооружение и реконструкция

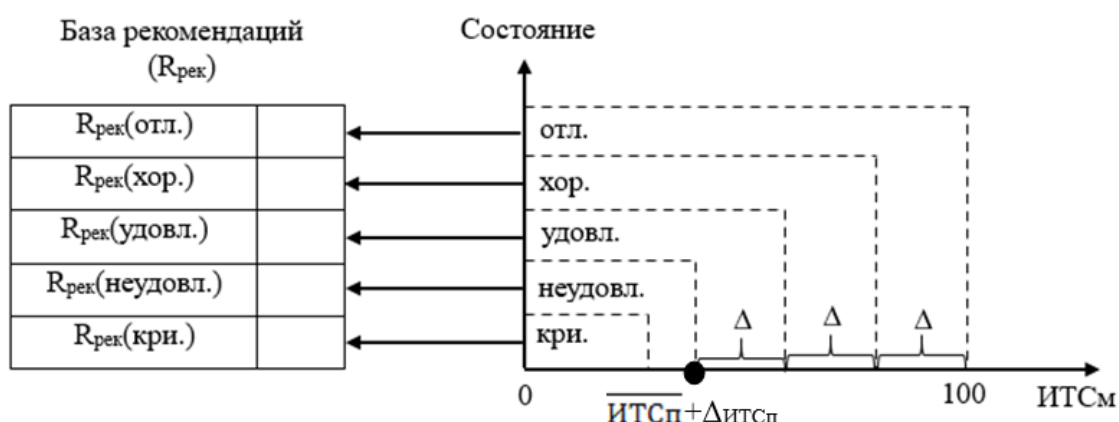


Рис. 2. - Формирование рекомендаций на основе качественной оценки состояния технических объектов с использованием лингвистической шкалы

Пусть имеется множество ресурсов $\{R_k\}, k = \overline{1, l}$ (специалистов по ТОиР), множество функциональных узлов $V = \{y_i\}, i = \overline{1, n}$, для которых необходимо выполнить техническое обслуживание. Варианты возможного распределения специалистов по узлам представим множеством пар $RV = \{ \langle R_k, y_i \rangle, i = \overline{1, n}; k = \overline{1, l} \}$. Это множество пар «специалист - узел» называют в теории

множеств графиком соответствия. Возможных вариантов графика соответствия $(RV)_j, j = \overline{1, \tau}$ может быть много. Необходимо из этого множества графиков выбрать рациональный вариант, наиболее выгодный с учетом возможных ограничений и критериев.

Ограничениями могут быть различные причины, по которым невозможно обслуживание части узлов объекта, например, отсутствие необходимых материалов; наличие ограничения по допустимому времени обслуживания $(T_{об}^{don})$, которое может быть больше, меньше или равно нормативному; время, необходимое k -му специалисту для технического обслуживания i -го узла $\{T_i^k\}, i = \overline{1, n}; k = \overline{1, l}$; отсутствие в данный момент нужного специалиста и т.д. Может существовать нормативная карта (технология) обслуживания узлов объекта с матрицей смежности $A^0(n+2, n+2)$ и соответствующим графом $G^1(V, A^0)$. Критериями могут быть время обслуживания сложного технического объекта $(T_{об}^p)$, величина ΔI_i , на которую увеличится ИТСм i -го узла, величина ΔI , на которую увеличится ИТСм объекта после технического обслуживания, а также величина интегрального показателя ИТСм технического объекта.

Постановка задачи. Заданы исходные данные по сложному техническому объекту (структуре $G(V, A)$, узлам $V = \{y_i\}, i = \overline{1, n}$, рабочим параметрам) и ресурсам $\{T_i^k\}, i = \overline{1, n}; k = \overline{1, l}$, а также нормативная информация (норма времени обслуживания $T_{об}^n$, нормативный граф (порядок) обслуживания $G^1(V, A^0)$). Необходимо найти такой график соответствия

$$opt RV = (RV)^*, \text{ при котором достигается: } \begin{cases} \min_{(RV)^*} (T_{об}^p); \\ \max_{(RV)^*} \Delta I, \end{cases} \text{ т.е. минимум времени}$$

обслуживания технического объекта и максимум ИТСм после технического обслуживания. Это конкурирующие критерии. Поэтому рассмотрим

несколько вариантов постановок и решений данной задачи. В целях упрощения допустим, что уровень квалификации специалистов влияет только на время обслуживания $\{T_i^k\}, i = \overline{1, n}; k = \overline{1, l}$ при обеспечении требуемого качества.

Вариант 1. Ограничения отсутствуют. График RV обладает свойством биективности, т.е. имеет место взаимно-однозначное соответствие (рис. 3), причём $n = l$. При этом работы по техническому обслуживанию выполняются согласно нормативной карте обслуживания технического объекта с матрицей смежности $A^0(n+2, n+2)$ и соответствующим графом $G^1(V, A^0)$ (рис. 4). Время обслуживания (T_{oo}^p) определяется как величина, равная критическому пути (максимальному значению) на графе $G^1(V, A^0)$ с учетом матрицы обслуживания $\{T_i^k\}$. Данную задачу можно решить методом дискретного динамического программирования Беллмана. Решением будет график соответствия (RV) , граф $G^1(V, A^0)$, время обслуживания (T_{oo}^p) будет равно максимальной длине по времени пути из пункта (0) в пункт $(n+1)$, что можем записать так $\max_V L(0, n+1)$. Визуализация графика может быть выполнена с помощью графика Ганта.

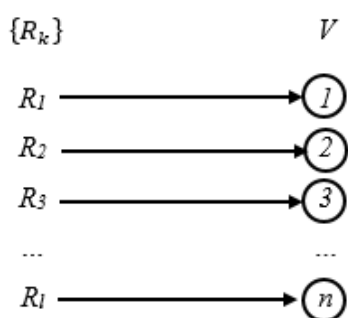


Рис. 3. - График соответствия RV

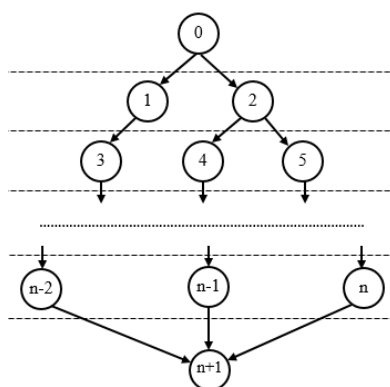


Рис. 4. - Граф $G^1(V, A^0)$ нормативной карты обслуживания

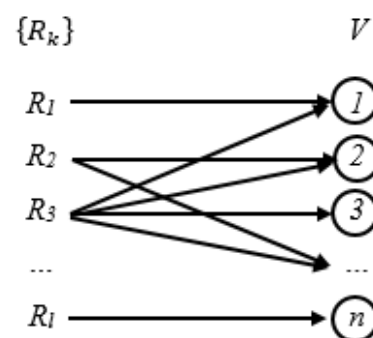


Рис. 5. - Пример графика соответствия RV

Вариант 2. Ограничения отсутствуют. График RV не является функциональным, т.е. специалист может обслужить несколько узлов последовательно, и может быть не инъективным (рис. 5). Конечный график должен быть инъективным, т.е. один узел обслуживается одним специалистом (или одной группой, если группа рассматривается единицей ресурса). Необходимо найти наилучший вариант по критерию $\min_{(RV)^*} (T_{об}^P)$, т.е. времени технического обслуживания. Сформируем методом перебора множество вариантов графиков $(RV)_j, j = \overline{1, \tau}$ с графами $G^j(V, A^{0j})$ и матрицами смежности $A^{0j}(n+2, n+2)$. Алгоритм формирования множества $(RV)_j, j = \overline{1, \tau}$ включает следующие шаги:

Шаг 1. Приведение нормативного графа $G^1(V, A^0)$ к ярусно-параллельной форме с подмножествами $\{V_s\}, s = \overline{1, S'}$, где S' - количество ярусов.

Шаг 2. Приписать к вершинам (узлам) допустимые ресурсы $\{R_k\}$ на основе матрицы $\{T_i^k\}, i = \overline{1, n}; k = \overline{1, l}$.

Шаг 3. Сформировать варианты графов $G^j(V, A^{0j})$, при которых соблюдается условие инъективности полученного графика $(RV)_j, j = \overline{1, \tau}$.

Шаг 4. При наличии одного ресурса при двух вершинах проведем дополнительную направленную связь от вершины с большим весом C_i к вершине с меньшим весом C_j , что может означать появление дополнительного яруса.

Шаг 5. Найдем величину критического пути для графиков $(RV)_j, j = \overline{1, \tau}$ методом дискретного динамического программирования. Обозначим $L_j^{RV} = \max_{(RV)_j} L(0, n+1)$ - максимальный путь для варианта графика $(RV)_j$ графа $G^j(V, A^{0j})$.

Шаг 6. Найдем наименьшее значение времени обслуживания технического объекта $\min_j L_j^{RV}$, пусть это будет вариант (j^*) , тогда решением

будет вариант графика $(RV)_{j^*}$, граф карты обслуживания $G^{j^*}(V, A^{0j^*})$, время обслуживания $T_{об}^p = L_{j^*}^{RV}$.

Вариант 3. Имеется ограничение по времени выполнения ТОиР. Ограничение по ресурсам, при котором последовательное выполнение работ удлиняет время обслуживания, также сводится к данному варианту. Пусть график RV обладает свойством инъективности, проекция графика RV на вторую ось совпадает с областью прибытия. В отличие от варианта 2 здесь есть ограничение по допустимому времени обслуживания ($T_{об}^{don}$), которое может быть больше, меньше или равно нормативному. При $T_{об}^p \leq T_{об}^{don}$ данная задача сводится к варианту 2. При $T_{об}^p > T_{об}^{don}$ задача планирования работ по ТОиР ставится так.

Определить подмножество номеров узлов $V_{искл} \subseteq V$, обеспечивающих $\frac{\max}{V \setminus V_{искл}} \rightarrow I$, т.е. максимум ИТСм при исключении узлов $j \in V_{искл}$ из графика (RV) на техническое обслуживание из-за наличия ограничения по времени обслуживания. Предлагается следующий алгоритм решения задачи.

Шаг 1. Решить задачу по алгоритму, приведенному в варианте 2, найти $T_{об}^p$. Если $T_{об}^p \leq T_{об}^{don}$, то задача решена. Результаты решения приведены в шаге 6 варианта 2. Если $T_{об}^p > T_{об}^{don}$, то выполняется следующий шаг алгоритма.

Шаг 2. Формируется список узлов y_i' по возрастанию коэффициентов важности узлов C_i .

Шаг 3. Исключается узел y_1' из рассмотрения. Решается задача ТОиР по алгоритму, приведенному в варианте 2. Если $T_{об}^p \leq T_{об}^{don}$, тогда решением является полученный результат. Если расчетное время обслуживания больше допустимого, то исключается из рассмотрения следующий узел y_2' и повторяется алгоритм, приведенный в варианте 2. Процесс исключения узлов продолжается до тех пор, пока не получим выполнение ограничения $T_{об}^p \leq T_{об}^{don}$.

Шаг 4. Решение считается приемлемым, если ИТСм по

лингвистической шкале получит значение «хорошее» или «отличное». В противном случае рассматривается задача вывода технического объекта из эксплуатации или продления периода эксплуатации.

Шаг 5. Система мониторинга состояния сложного технического объекта формирует рекомендации на основе данных из базы рекомендаций.

Вариант 4. Ограничение по ресурсам не позволяет обслужить один или несколько узлов. Данный вариант связан с отсутствием специалиста или запасных деталей или другими причинами, по которым один или несколько узлов не могут быть обслужены. Необходимо сформировать вариант с наименьшим значением времени обслуживания технического объекта $\min_j L_j^{RV}$ при максимально возможном значении ИТСм. Алгоритм решения задачи следующий. Формируется подмножество узлов $V_{\text{искл}}$, которые не могут быть обслужены, множество узлов объекта для технического обслуживания корректируется: $V = I \setminus V_{\text{искл}}$. Задача планирования ТОиР решается в данном случае как в варианте 3 для множества узлов $V = I \setminus V_{\text{искл}}$. Пусть это будет вариант графика $(RV)_j^*$. Тогда граф карты обслуживания равен $G^{j^*}(V, A^{0j^*})$, время обслуживания равно $T_{об}^p = L_{j^*}^{RV}$.

Заключение

В работе предложена система экспресс-диагностики и планирования ремонтно-восстановительных работ сложного технического объекта на основе интегрального показателя «модифицированный индекс технического состояния». Приведена концептуальная модель информационной системы и описание ее функциональных модулей.

Значение интегрального показателя позволяет оценить ремонтпригодность технического объекта на основе порогового значения и остаточный ресурс. Для качественной оценки состояния технического объекта на

понятном специалисту языке предложена лингвистическая шкала и методика ее создания. Лингвистическая оценка состояния позволяет сформировать рекомендации по выполнению работ по ТОиР.

Для выбора рационального варианта выполнения ремонтно-восстановительных работ в условиях наличия ограничений на ресурсы в работе предложена методика расчетов.

Литература

1. Khuntia S., Rueda Torres J. L., Bouwman S., Van der Meijden M. A literature survey on asset management in electrical power [transmission and distribution] system // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2016. No.26(10). pp. 2123–2133. DOI: 10.1002/etep.2193.

2. Кокорев Г. Д., Успенский П. А., Николотов И. Н. Стратегии технического обслуживания и ремонта автомобильного транспорта // Агроинженерия. 2009. №3. С. 72-75.

3. Пухов Е. В., Комаров Я. В. Разработка информационной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом транспортных и технологических машин // Агроинженерия. 2016. №5 (75). С. 35-38.

4. Иноземцев А. Н., Анцев А. В. Повышение эффективности технической эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. №2. С. 60-66.

5. Андреева Л. И. Возможности повышения эффективности использования ресурсов в ремонтном производстве // Проблемы недропользования. 2015. №1. С. 134-141.

6. Боярова Д. А. Индекс технического состояния для оборудования 0,4-6(10) кв энергообъектов нефтедобычи // Наука. Технологии. Инновации. XV Всероссийская научная конференция молодых ученых, посвященная Году науки и технологий в России. Сборник научных трудов в 10-ти частях. Под

редакцией Д. О. Соколовой. Новосибирск, 2021. С. 7-12.

7. Томилов А. С., Никонова Е. З. Индекс технического состояния как новый подход к профилактике и обслуживанию электрооборудования // Современное программирование : материалы III Международной научно-практической конференции, Нижневартовск, 27–29 ноября 2020 года. – Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2021. С. 185-187.

8. Смурова Т. С., Сулыненков И. Н. Анализ методик определения индекса технического состояния оборудования // Энергия. 2018. Т. 6. №1. С. 141-142.

9. Хиеу В. Д., Файзрахманов Р. А. Модифицированная модель индекса технического состояния системы. Алгоритм расчета и анализ применимости // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2024. № 50. С. 5–24. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.01.

10. Хиеу В. Д., Файзрахманов Р. А. Методика и алгоритм экспресс оценки состояния сложных технических систем. Конструктивный подход. // Инженерный вестник Дона, 2024, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9172.

11. Хиеу В. Д. Методика определения порогового значения модифицированного индекса технического состояния оборудования на основе вероятности безотказной работы // Инженерный вестник Дона, 2025, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10094.

References

1. Khuntia S., Rueda Torres J. L., Bouwman S., Van der Meijden M. International Transactions on Electrical Energy Systems. 2016. №26(10). pp. 2123-2133. DOI: 10.1002/etep.2193.

2. Kokorev G. D., Uspenskiy P. A., Nikolotov I. N. Agroiinzheneriya. 2009. №3. pp. 72-75.
3. Puhov E. V., Komarov Ja. V. Agroiinzheneriya. 2016. №5 (75). pp. 35-38
4. Inozemcev A. N., Ancev A. V. Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki. 2010. №2. pp. 60-66.
5. Andreeva L. I. Problemy nedropol'zovaniya. 2015. №1. pp. 134-141.
6. Bojarova D. A. Nauka. Tehnologii. Innovacii. XV Vserossiyskaya nauchnaya konferenciya molodyh uchenyh, posvjashhennaya Godu nauki i tehnologij v Rossii. Sbornik nauchnyh trudov v 10-ti chastyah. Pod redakciej D. O. Sokolovoj. Novosibirsk, 2021. pp. 7-12.
7. Tomilov A. S., Nikonova E. Z. Sovremennoe programmirovanie: materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Nizhnevartovsk, 27–29 nojabrja 2020 goda. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovskij gosudarstvennyj universitet, 2021. pp. 185-187.
8. Smurova T. S., Sulynenkov I. N. Jenergija. 2018. T. 6. №1. pp. 141-142.
9. Hieu V. D., Fayzrakhmanov R. A. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Jelektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija. 2024. №50. pp. 5-24. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.01.
10. Hieu V. D., Fayzrakhmanov R. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9172.
11. Hieu V. D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10094.

Дата поступления: 14.07.2025

Дата публикации: 25.08.2025