

Методика комплексной оценки показателей эффективности систем технического диагностирования и мониторинга

С. В. Бочкарев, А. А. Лыков, Д. С. Марков

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

Аннотация. Предложена методика комплексной оценки показателей эффективности систем технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Она базируется на расчете многоуровневой системы показателей с учетом особенностей объектов диагностирования.

Ключевые слова: системы технического диагностирования и мониторинга; показатели эффективности; показатели надежности; методика и алгоритм комплексной оценки показателей эффективности.

1 Введение

В последние десятилетия на железных дорогах России осуществляется поэтапное внедрение и модернизация СТДМ ЖАТ.

Внедрение СТДМ, которые осуществляют непрерывный контроль работоспособности устройств железнодорожной автоматики, позволяет сократить количество отказов и снизить эксплуатационные расходы на техническую эксплуатацию систем ЖАТ.

В конечном счете, основным назначением СТДМ является обеспечение безопасной и безотказной работы устройств ЖАТ.

Для достижения вышеперечисленных целей СТДМ должна решать такие функциональные задачи, как:

- выявление отказов и сбоев в работе устройств ЖАТ;
- прогнозирование технического состояния устройств ЖАТ (выявление предотказных состояний);
- сокращение времени восстановления устройств ЖАТ при отказах.

Для решения вышеперечисленных функциональных задач СТДМ должна:

- автоматически измерять параметры и оценивать характеристики устройств ЖАТ;
- выполнять автоматическую регистрацию изменений параметров или состояний устройств ЖАТ;

- протоколировать режимы работы;
- осуществлять сбор, обработку, передачу, хранение и отображение диагностической информации.

Кроме того, СТДМ должны интегрироваться с действующими и создаваемыми информационными и управляющими системами различных служб железнодорожного транспорта.

Принятие решений СТДМ должно проводиться на основе системного подхода, т. е. на основе количественной оценки показателей эффективности СТДМ для различных вариантов ее организации.

Существует несколько подходов к оценке эффективности систем диагностирования.

1. *Определение показателей качества работы СТДМ* [1].

Методы, реализующие данный подход, позволяют определить показатели качества работы СТДМ путем анализа оценки состояний диагностируемых устройств. Недостаток подхода – отсутствие оценки показателей надежности диагностируемой системы.

2. *Определение показателей надежности эксплуатируемой системы* [2].

Методы рассматриваемого подхода позволяют оценить влияние характеристик СТДМ на бесперебойность и безопасность работы диагностируемых устройств и систем.

С точки зрения диагностирования систем ЖАТ недостаток подхода – отсутствие оценки влияния системы на безопасность и бесперебойность движения поездов; затраты, связанные с техническим обслуживанием.

3. *Определение показателей безопасности и бесперебойности процесса, управляемого эксплуатируемой системой.*

В этом случае можно оценить влияние сокращения отказов эксплуатируемой системы ЖАТ на сбои в движении поездов при внедрении СТДМ. При таком подходе рассматривают коэффициент безопасности и

коэффициент технического использования при отсутствии и внедрении СТДМ.

Недостаток подхода – не учитывается изменение эксплуатационных расходов при внедрении СТДМ.

4. *Определение экономической эффективности системы диагностирования* [3].

Суть метода заключается в сравнении сокращения потерь от отказов СЖАТ и затрат на внедрение СТДМ.

Недостаток подхода – не учитываются показатели безопасности и безотказности работы устройств, безопасности и бесперебойности движения поездов.

Таким образом, представляется целесообразным разработать методику комплексной оценки эффективности СТДМ, которая бы учитывала и особенности эксплуатации устройств СЖАТ, такие как:

- непрерывный характер работы;
- территориальная рассредоточенность;
- длительный срок службы;
- сетевое внедрение;
- сложные условия эксплуатации.

2 Методика оценки эффективности

2.1 Комплексная система показателей эффективности СТДМ

Работа СТДМ должна оцениваться на основе анализа показателей надежности устройств ЖАТ и эффективности перевозочного процесса с учетом особенностей объекта диагностирования. Для таких СТДМ концепция оценки эффективности базируется на иерархической многоуровневой системе взаимосвязанных показателей и характеристик, в которой показатели данного уровня рассчитываются только с использованием характеристик предыдущего. Причем система должна включать на нижнем уровне показатели оценки собственно СТДМ (например, вероятность правильной оценки состояния диагностируемых устройств), на следующем – показатели надежности диагностируемых устройств (например, коэффициент технического использования и коэффициент безопасности устройств ЖАТ), на верхнем уровне – показатели безопасности и бесперебойности движения поездов. Предлагаемая

в работе система показателей представлена на рис. 1 и базируется на сформулированной выше концепции. По мнению авторов, она позволяет наиболее полно оценить СТДМ в соответствии с ее назначением. Система является иерархической и включает 6 уровней.

К первому уровню относятся показатели безопасности и бесперебойности движения поездов. Показатель бесперебойности S_3 определяется как вероятность задержки поездов $P_{зп}$.

Под задержкой движения поездов будем понимать событие, когда время восстановления T_v превысило некоторое допустимое значение времени $T_{доп}$.

Пусть $T_{пер}$ – период графика движения поездов; V_n – количество поездов в графике движения; T_p – время, в течение которого устройство находилось в работоспособном состоянии: $T_p = K_{ти} \cdot T_{пер}$. Тогда количество поездов, которые проследуют без задержек:

$$V_{сп} = \frac{V_n T_p}{T_{пер}}. \quad (1)$$

Вероятность задержки поезда

$$P_{зп}(T_c) = \frac{V_n - V_{сп}}{V_n} \cdot K_{оз}, \quad (2)$$

где $K_{оз}$ – вероятность того, что произошедший отказ приведет к задержке поезда.

$$K_{оз} = \frac{N_3}{N_o},$$

где N_o – общее количество отказов;

N_3 – количество отказов, которые привели к задержке поездов.

Безопасность движения (S_6) – свойство движения поезда не переходить в опасное состояние. Показатель безопасности движения поездов – вероятность следования поезда без перехода его в опасное состояние $P(T_c)$ за интервал времени T_c :

$$P(T_c) = 1 - Q(T_c), \quad (3)$$

где $Q(T_c)$ – вероятность движения поездов с переходом в опасное состояние за время T_c .

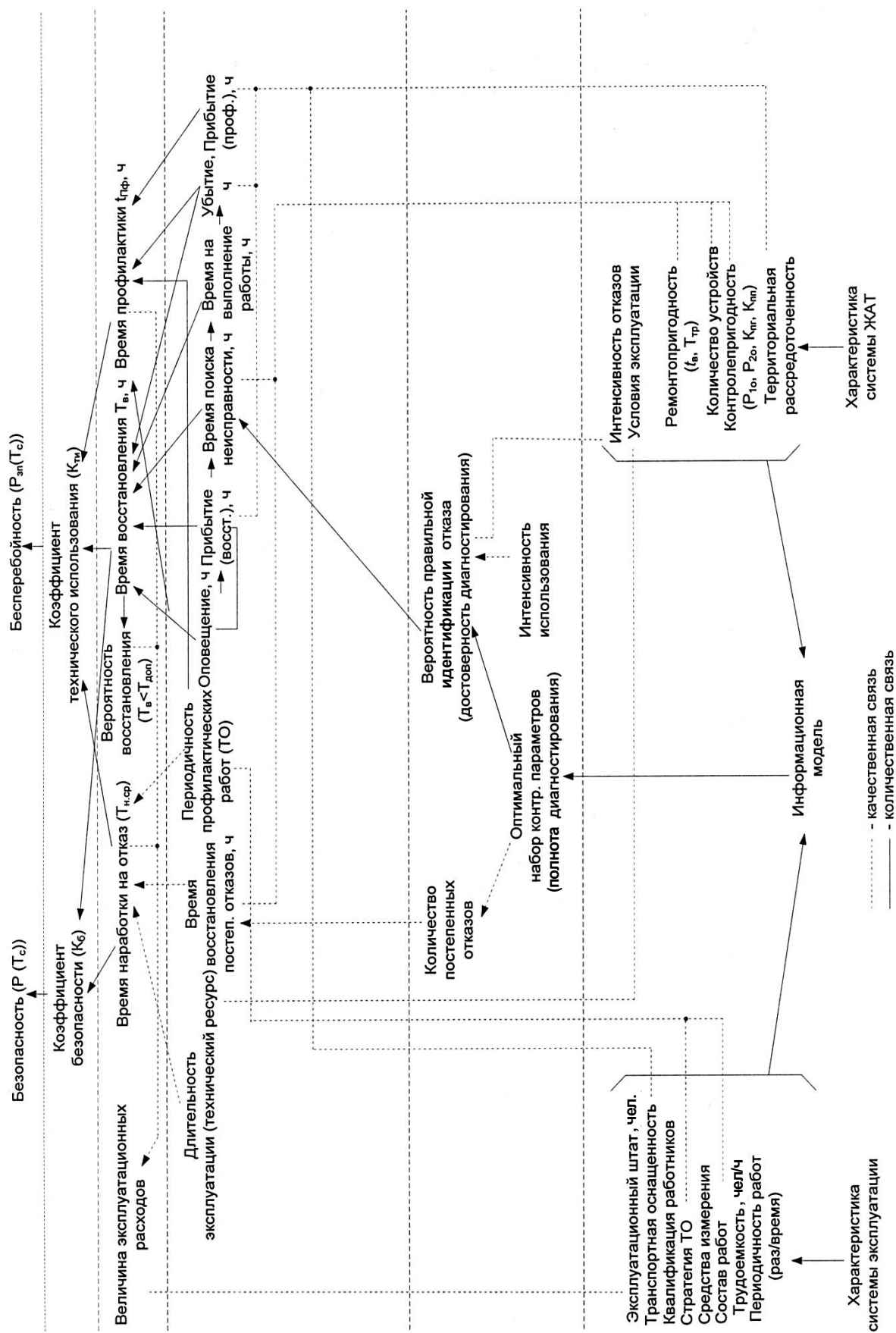


Рис. 1 Система показателей эффективности СТДМ

$$Q(T_c) = P_{oo}(T_c) \cdot (1 - K_6), \quad (4)$$

где K_6 – коэффициент безопасности, отражающий вероятность того, что система окажется в работоспособном или защитном состоянии в произвольный момент времени;

P_{oo} – вероятность того, что опасный отказ вызовет переход движения поездов в опасное состояние за интервал времени T_c .

$$P_{oo}(T_c) = \frac{N_{оп}(T_c)}{N_o(T_c)}, \quad (5)$$

где $N_{оп}$ – количество опасных отказов, которые привели к переходу в опасное состояние

Безопасность движения зависит от количества отказов, которые приводят к опасным состояниям, и от интенсивности движения.

На втором уровне выделим показатели эффективности, связанные с надежностью [4] устройств СЖАТ, которые обеспечивают безопасность движения:

- коэффициент технического использования [4]:

$$K_{ти} = \frac{T_{нсп}}{T_{нсп} + T_v + T_{пф}}, \quad (6)$$

где $T_{нсп}$ – средняя наработка на отказ;

T_v – среднее время восстановления;

$T_{пф}$ – математическое ожидание времени нахождения объекта в отключенном состоянии для производства профилактических работ;

- коэффициент безопасности [4], определяемый как

$$K_6 = \frac{T_{бсп}}{T_{бсп} + T_v}, \quad (7)$$

где $T_{бсп}$ – средняя наработка на опасный отказ.

Величина T_v [5] определяется следующей суммой:

$$T_v = t_{опв} + t_{впб} + t_{тз} + t_{срп} + t_{сру} + t_{уб}, \quad (8)$$

где $t_{опв}$ – время оповещения о неисправности;

$t_{срп}$ – среднее время поиска неисправности;

$t_{сру}$ – время устранения неисправности;

$t_{впб}$ – среднее время прибытия к объекту при восстановлении;

$t_{уб}$ – среднее время убытия от объекта после восстановления;

$t_{тз}$ – техническая задержка [5].

Средняя наработка на опасный отказ:

$$T_{бсп} = \frac{1}{\omega(t)} = \frac{T_c}{N_{oo}(T_c)}, \quad (9)$$

где N_{oo} – количество опасных отказов за период Δt .

На третьем уровне рассмотрены показатели эффективности, которые отражают техническое состояние устройств СЖАТ в процессе эксплуатации и техническое обслуживание (ТО):

- время наработки на отказ:

$$T_{нсп} = \frac{1}{\omega(t)} = \frac{T_c}{N_o(T_c)}; \quad (10)$$

- вероятность восстановления $S(t)$ – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного времени t :

$$S(t) = P(T_v < T_{доп});$$

- время профилактики $T_{пф}$:

$$T_{пф} = t_{поб} + t_p + t_{уб}, \quad (11)$$

где $t_{поб}$ – среднее время прибытия к объекту при профилактике;

t_p – время выполнения самой работы;

- время восстановления T_v ;

К четвертому уровню относятся показатели, определяющие количество и качество ТО:

- длительность эксплуатации;

- время восстановления работоспособного состояния при возникновении постепенных отказов;

- периодичность профилактических работ;

- временные составляющие, характеризующие время восстановления и время профилактики.

На пятом уровне выделены характеристики СТДМ:

- оптимальный набор контролируемых параметров (полнота диагностирования).

Показатель полноты диагностирования D_n рассчитывается как

$$D_n = \frac{\overline{\Pi_n}}{\Pi}, \quad (12)$$

где Π – общее число диагностических параметров, которые характеризуют состояние объекта диагностирования (ОД);

$\overline{\Pi_n}$ – число измеряемых диагностических параметров.

- количество постепенных отказов [6];
- вероятность правильной идентификации отказа (достоверность диагностирования) [1]:

$$D_d = \frac{P_o^2 (P_T + q_p)}{P_o^2 (P_T + q_p) + Q_o (q_{no} P_T + Q_o q_p)}, \quad (13)$$

где P_o – вероятность безотказной работы ОД;

Q_o – вероятность отказа ОД;

P_T – вероятность безотказной работы СТДМ;

q_{no} – вероятность необнаружения отказов;

q_p – вероятность того, что технические средства диагностирования (ТСД) из-за возникших дефектов оценивают объект как работоспособный:

$$q_p = \frac{\sum_{i=1}^{m_e} \lambda_i}{\sum_{i=1}^L \lambda_i},$$

где m_e – количество элементов, отказ в которых приводит к одному типу проявления неисправности;

L – общее число измерительных блоков СТДМ;

λ_i – интенсивность отказа i -го элемента.

Достоверность диагностирования позволяет определить коэффициент эффективности поиска K_{Π} [7]:

$$K_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^{m_p} t_{\Pi i}}{D_d}, \quad (14)$$

где t_{Π} – время проверки элемента, неисправность которого привела к отказу объекта диагностирования.

Согласно рассматриваемому методу проверка начинается с самого ненадежного или быстро проверяемого элемента. Тогда среднее время поиска неисправности:

$$t_{\text{ср.п}} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{\Pi i}}{n}, \quad (15)$$

где n – количество типов проявления неисправности.

На шестом уровне выделены характеристики и показатели системы эксплуатации устройств ЖАТ, которые составляют информационную модель объекта диагностирования, включающую в себя характеристики СТДМ, такие как: набор контролируемых параметров, алгоритмы поиска неисправностей, алгоритмы фиксации предотказных состояний, контроль выполнения графика ТО, контроль функционирования устройства; информационные характеристики эксплуатируемой системы, такие как статистика результатов измерения параметров устройства, статистика нарушений в работе устройства, способы проведения измерений параметров устройства, техническая оснащенность.

К расчетным характеристикам системы ЖАТ относятся:

1. Контролепригодность [8]:

- вероятность обнаружения отказа – вероятность фиксации отказа в момент его возникновения P_{10} :

$$P_{10} = \frac{N_p}{N_o}, \quad (16)$$

где N_p – количество отказов, фиксируемых в момент их возникновения;

N_o – общее количество отказов;

- вероятность фиксации отказа в момент срабатывания устройства P_{20} :

$$P_{20} = \frac{N_c}{N_o}, \quad (17)$$

где N_c – количество отказов, фиксируемых в момент срабатывания устройства;

- коэффициент глубины поиска дефекта:

$$K_{\Pi} = \frac{F}{R}, \quad (18)$$

где F – число составных узлов устройства, в которых определяется отказ;

R – общее число составных узлов устройства, в которых требуется определить отказ;

- коэффициент полноты проверки исправности:

$$K_{\Pi} = \frac{\lambda_k}{\lambda_o}, \quad (19)$$

где λ_k – суммарная интенсивность отказов проверяемых составных частей изделия;

λ_o – суммарная интенсивность отказов всех составных узлов устройства;

▪ средняя продолжительность поиска отказа $t_{\text{срп}}$.

2. Ремонтопригодность [9]:

▪ среднее время восстановления [10]:

$$t_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (20)$$

где λ_i – интенсивность отказов составной части (или блока), замена которой возможна в эксплуатации в случае отказа;

t_i – время, которое необходимо на выполнение работ по восстановлению работоспособности изделия в случае отказа составной части (или блока);

N – количество составных частей (или блоков), которые могут быть заменены в эксплуатации в случае их отказа.

Статистически интенсивность отказов определяется по формуле [4]:

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}} \Delta t}, \quad (21)$$

где $N_{\text{ср}} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$ – среднее число исправно работающих объектов в интервале Δt ;

N_i – число исправных объектов в момент времени $t - \frac{\Delta t}{2}$;

N_{i+1} – число исправных объектов в момент времени $t + \frac{\Delta t}{2}$;

$n(\Delta t)$ – число объектов, отказавших в интервале времени от $t - \Delta t / 2$ до $t + \Delta t / 2$;

▪ средняя трудоемкость восстановления $T_{\text{тр}}$ [10].

$$T_{\text{тр}} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i (t_{1i} m_{1i} + t_{2i} m_{2i} + \dots + t_{7i} m_{7i})}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (22)$$

где $m_{1i}, m_{2i}, \dots, m_{ni}$ – количество человек, занятых при выполнении ремонта;

t_{1i} – затраты времени на подготовку изделия к ремонту;

t_{2i} – затраты времени на выполнение работ, обеспечивающих доступ к отказавшей составной части или подсистеме;

t_{3i} – затраты времени на снятие отказавшего блока;

t_{4i} – затраты времени на установку исправного блока взамен отказавшего;

t_{5i} – затраты времени на приведение изделия в состояние готовности для проведения контроля технического состояния после ремонта;

t_{6i} – затраты времени на проведение контроля после ремонта;

t_{7i} – затраты времени на приведение изделия в работоспособное состояние после текущего ремонта.

К расчетной характеристике системы эксплуатации относится трудоемкость (затраты труда на измеритель):

$$v_i = \sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^{K-X} 1,07 \cdot n_{\text{впр}} f \cdot 1,226 + \sum_{l=1}^X 1,07 \cdot n_{\text{впр}} f \cdot 1,226 \right), \quad (23)$$

где M – количество устройств одного класса;

K – количество регламентных работ, утвержденных инструкцией ЦШ-720-09;

X – количество автоматизированных проверок;

$n_{\text{впр}}$ – норма времени на измеритель;

1,07 – разница трудозатрат за 4 недели и месяц;

1,226 – коэффициент, учитывающий время на подготовительно-заключительные действия ($T_{\text{пз}}$), время обслуживания рабочего места ($T_{\text{об}}$), время на отдых и личные нужды ($T_{\text{от.л}}$).

На основе характеристик (квалификация работников, стратегия ТО, транспортная оснащенность, средства измерения) и показателей (состав, периодичность, трудоемкость профилактических работ) эксплуатации устройств ЖАТ определяется величина эксплуатационных расходов.

Изменение эксплуатационных расходов на техническое содержание и обслуживание технических средств ЖАТ определяется разницей между эксплуатационными расходами до внедрения СТДМ и с учетом внедрения средств автоматизации.

Значения M , N_i , N_{i+1} , N_p , N_o , N_{oo} , N_c , $N_{оп}$, N_3 определяются по данным подсистемы учета отказов АСУ-III.

Значения F , R , m_i , f , $n_{вpi}$, K , X определены в Инструкции по техническому обслуживанию устройств ЖАТ ЦШ-720-09.

2.2 Алгоритм оценки показателей эффективности СТДМ

Разработанная система показателей эффективности СТДМ позволила синтезировать алгоритм их расчета (рис. 2) по предложенным на рис. 1 уровням снизу вверх.

Исходные данные:

- характеристики системы эксплуатации объекта диагностирования (F , R , m_i , f , $n_{в.i}$, K , m , n , Π , $\overline{\Pi_i}$);
- статистика отказов (N_i , N_{i+1} , N_p , N_o , N_{oo} , N_c , $N_{оп}$, N_3);
- временные составляющие профилактических и восстановительных работ ($t_{ппб}$, $t_{впб}$, $t_{уб}$, $t_{тз}$, $t_{опв}$, $t_{пр}$);
- интенсивность отказов узлов объекта диагностирования (λ_k , λ_o , λ_i);
- количество человек, занятых выполнением технического обслуживания (m_i);
- список автоматизированных измерений объекта диагностирования (X);
- количество поездов в графике движения поездов (V_p);
- период анализа графика движения поездов ($T_{пер}$, T_c);
- общее число измерительных блоков СТДМ (L);
- вероятность безотказной работы СТДМ (P_T).

VI уровень: построение информационной модели, расчет показателей систем эксплуатации устройств ЖАТ (операторы 4–8), расчет показателей систем ЖАТ (операторы 9, 10).

V уровень: расчет полноты диагностирования (операторы 11–17), расчет достоверности диагностирования (операторы 18–22).

IV уровень: расчет времени поиска неисправности (операторы 25, 27).

III уровень: расчет времени восстановления, время предотвращения (восстановления) предотказных состояний (постепенных отказов) и время профилактики (операторы 26, 28), определение вероятности восста-

новления (операторы 29, 30), расчет времени наработки на отказ (операторы 31, 32).

II уровень: расчет коэффициента безопасности (оператор 33), расчет коэффициента технического использования (оператор 34).

I уровень: оценка безопасности движения поездов (операторы 35, 36), оценка бесперебойности движения поездов (операторы 37–39), определение величины эксплуатационных расходов.

Методика опробована на примере расчета показателей эффективности внедрения СТДМ для стрелочного электропривода постоянного тока и схемы управления.

Внедрение средств технического диагностирования и мониторинга учитывается в системе показателей при расчете следующих величин: $K_{пп}$, $K_{пп}$, v , D_p , T_v , $T_{нсп}$, $T_{бсп}$, $K_{ти}$, K_b , $P_{зп}$, $Q(T_c)$.

3 Заключение

Разработана методика комплексной оценки показателей эффективности, позволяющая учесть характеристики как СТДМ, так и систем ЖАТ и их влияние на движение поездов.

Корректность методики подтверждается полученными результатами расчетов показателей II уровня для стрелочного электропривода (СЭП) и схемы управления: $K_b = 0,985$, $K_{ти} = 0,63$ – по инструкции ЦШ-720-09 и $K_b = 0,986$, $K_{ти} = 0,77$ – при внедрении СТДМ, что не противоречит известным значениям показателей.

Предложенная методика позволяет оценить:

- изменение величины эксплуатационных расходов на обслуживание устройств ЖАТ (операторы 8–10);
- выбор оптимального количества контролируемых параметров устройств ЖАТ (операторы 11–17);
- достоверность диагностирования и прогнозирования технического состояния устройств ЖАТ (операторы 18–22).

Развитием методики расчета показателей эффективности является совершенствование метода расчета безопасности и бесперебойности движения поездов.

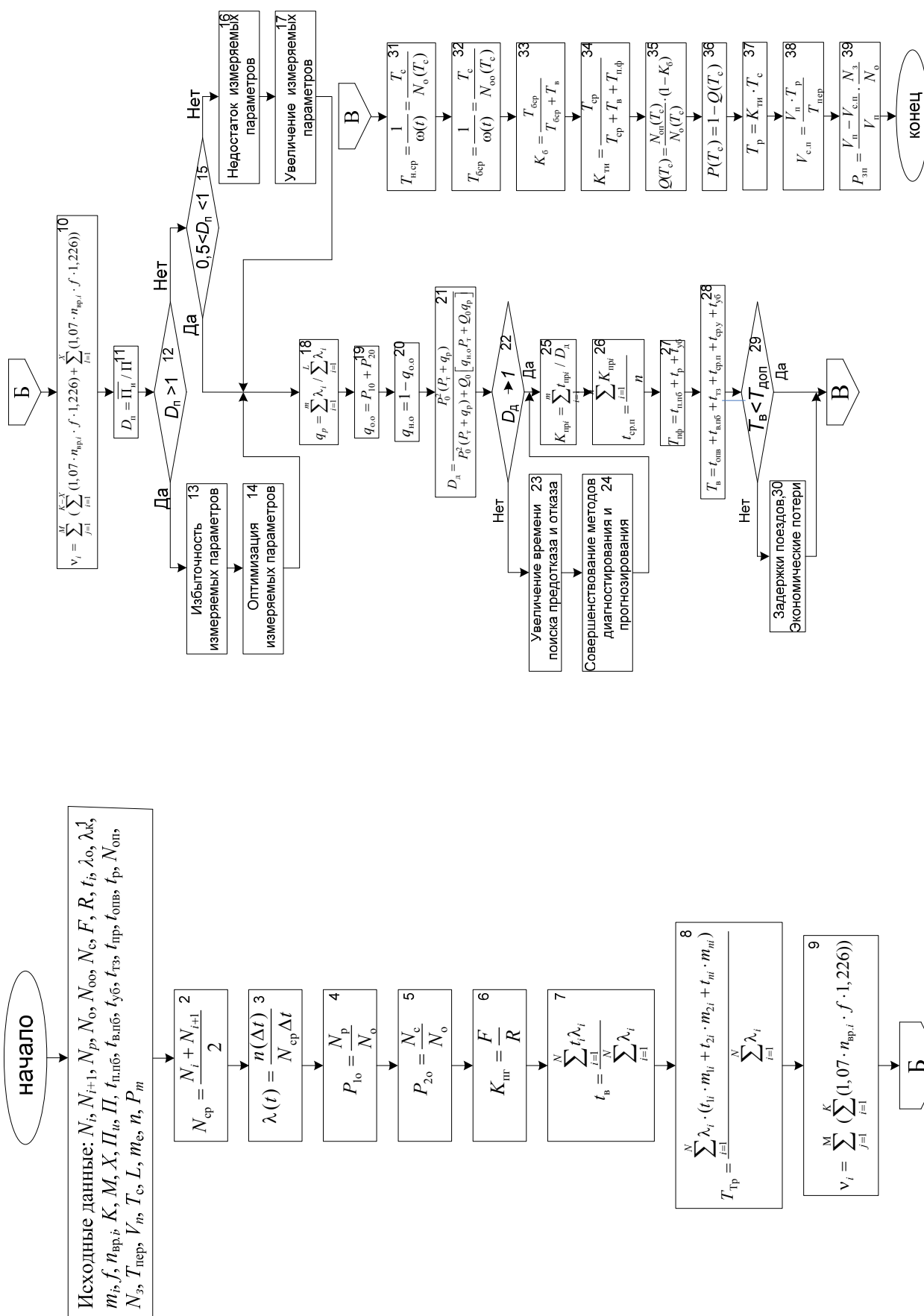


Рис. 2 Алгоритм расчета показателей эффективности СТДМ

Предложенный алгоритм может использоваться при моделировании и анализе показателей эффективности СТДМ для решения следующих задач:

- разработка механизма розыгрыша значений случайных переменных (параметры СТДМ и систем ЖАТ);
- организация сбора и хранения промежуточных результатов моделирования;
- предварительная обработка результатов моделирования (статистические оценки показателей эффективности СТДМ различных уровней).

Такой подход предполагает разработку соответствующего программного обеспечения.

Библиографический список

1. *Калявин, В. П.* Надежность и диагностика элементов электроустановок: учебное пособие для вузов / В. П. Калявин, Л. М. Рыбаков. – Санкт-Петербург: Элмор, 2009. – 336 с. – ISBN 978-5-7399-0150-7.
2. *Горяинов, А. Н.* Определение эффективности систем диагностирования в теории транспортной диагностики / А. Н. Горяинов. – Харьков: ХНАГХ. – 2012. – С. 64–70.
3. *Сапожников, Вл. В.* Эффективность систем технической диагностики и мониторинга состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Вл. В. Сапожников, А. А. Лыков, Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 4 (29). – С. 47–49.
4. *Сапожников, В. В.* Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов; под ред. Вл. В. Сапожникова. – Москва: Маршрут, 2003. – 263 с. – ISBN 5-89035-119-2.
5. *ОСТ 45.65–96.* Методика расчета среднего времени восстановления оборудования электро-связи. – Москва, 1997. – 8 с.
6. *Сапожников, Вл. В.* Понятие предотказного состояния / Вл. В. Сапожников, А. А. Лыков, Д. В. Ефанов // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 12. – С. 6–8.
7. *Перникис, Б. Д.* Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ / Б. Д. Перникис, Р. Ш. Ягудин. – Москва: Транспорт, 1994. – 254 с. – ISBN 5-277-01433-0.
8. *ГОСТ 26656–85.* Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования. – Москва, 2009. – 10 с.
9. *ГОСТ 21623–76.* Система технического обслуживания и ремонта техники. Показатели для оценки ремонтпригодности. Термины и определения. – Москва, 2006. – 13 с.
10. *Животкевич, И. Н.* Надежность технических изделий / И. Н. Животкевич, А. П. Смирнов. – Москва: Институт испытаний и сертификации вооружений и военной техники, 2004. – 472 с. – ISBN 5-98040-003-6.