

На правах рукописи



Хоанг Нгок Ань

**Математическое и алгоритмическое обеспечение
вычисления показателей эффективности обслуживания
и ремонта сложного оборудования**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и
обработка информации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск 2021

Работа выполнена на кафедре «Информатика и математическое моделирование» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского»

- Научный руководитель:** Краковский Юрий Мечеславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» ФГБОУ ВО «ИрГУПС»
- Официальные оппоненты:** Тырсин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «УрФУ», г. Екатеринбург
- Николайчук Ольга Анатольевна, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория «Информационно-коммуникационных технологий исследования природной и техногенной безопасности» ФГБУН «ИДСиТУ», г. Иркутск
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ангарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АнГТУ»), г. Ангарск

Защита диссертации состоится 03 февраля 2022 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 44.2.002.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ауд. А-803, тел. 8-(3952)-63-83-94, e-mail: diss_sovet@irgups.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», <http://www.irgups.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенной печатью организации, просим направлять по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан _____ 2021 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



А.В. Данеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие техники и технологий привело к созданию и совершенствованию методов и средств обеспечения надежного функционирования оборудования различного назначения. К этим средствам относят методы надежности, а также средства мониторинга и диагностики сложного оборудования.

Среди отечественных и зарубежных специалистов, внесших существенный вклад в теорию надежности и диагностики, можно отметить следующих: Барзилевич Е.Ю., Беляев Ю.К., Болотин В.В., Гнеденко Б.В., Каштанов В.А., Острейковский В.А., Тимашев С.А., Ушаков И.А., Байхельт Ф., Богданофф Дж., Франкен П. и др.

Надежное функционирование оборудования во многом определяется используемой системой его технического обслуживания и ремонта. В связи с этим, в нашей стране и за рубежом развиваются и совершенствуются различные технологии его обслуживания и ремонта. Обслуживание и ремонт оборудования происходит в условиях ограниченных финансовых ресурсов, поэтому в организацию ремонтных работ широко внедряются различные методы системного анализа, математического и имитационного моделирования.

Отметим отечественных и зарубежных специалистов, внесших вклад в развитие и применение методов системного анализа, включая принятие управленческих решений, имитационного моделирования, теорию рисков, статистические и экспертные методы: Алексеев Е.Р., Дубов А.М., Емельянов А.А., Королев В.Ю., Ногин В.Д., Орлов А.В., Перегудов Ф.И., Поспелов Д.А., Цвиркун А.Д., Цисарь И.Ф., Черноруцкий И.Г., Кельтон В., Лоу А., Клир Дж., Прицкер А. и др.

Диссертационное исследование посвящено исследованию обслуживания и ремонта сложного оборудования в условиях неопределенности и ограниченных финансовых ресурсов. В диссертационной работе рекомендована процедура обслуживания и ремонта сложного оборудования, использующая страховой фонд, который выполняет две функции: 1) накапливает платежи с заданной периодичностью для выполнения различного вида ремонтных работ; 2) по мере необходимости оплачивает эти работы. Математическое описание состояния страхового фонда в момент времени t предлагается провести на основе процесса риска специального вида, используемого в математической теории риска¹.

Для моделирования этого процесса риска предложено использовать имитационный подход, предполагающий создание моделирующей программы на основе событийного метода, которая создает выборочные значения моментов времени, когда финансовые ресурсы для выполнения ремонтных работ оборудования отсутствуют. Эти значения затем обрабатываются по предложенным алгоритмам с целью получения значений показателей эффективности обслуживания оборудования. Поиск моделей для оценки эффективности ремонтных работ сложного оборудования в процессе его эксплуатации является актуальной задачей, требующей своего решения. Все выше сказанное обосновывает актуальность выбранной темы диссертационной работы и позволяет сформулировать ее цель и задачи.

¹Королев В.Ю. и др. Математические основы теории риска. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 620 с.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности принятия управленческих решений за счет разработки и применения математического, алгоритмического и программного обеспечения вычисления показателей, оценивающих обслуживание и ремонт сложного оборудования в процессе его эксплуатации.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Создать математическое обеспечение, используя процесс риска, для моделирования обслуживания и ремонта оборудования с применением страхового фонда, выполняющего функции по накоплению платежей с различной периодичностью и по оплате этих работ по мере необходимости.

2. Выбрать вероятностные модели, используемые при описании компонент процесса риска и необходимые для моделирования интервалов времени между ремонтными работами и затрат на их выполнения.

3. Разработать алгоритмическое обеспечения вычисления показателей эффективности обслуживания и ремонта оборудования по данным имитационного моделирования.

4. Создать программный комплекс для моделирования и комплексного исследования обслуживания и ремонта сложного оборудования по предложенным показателям эффективности.

5. Провести апробацию созданного алгоритмического и программного обеспечения по влияющим факторам на основании вычислительных экспериментов с моделирующей программой по выбранным исходным данным.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования в диссертационной работе является обслуживание и ремонт сложного оборудования в процессе его эксплуатации. Предметом диссертационного исследования являются математическое и алгоритмическое обеспечение применительно к вычислению предложенных показателей риска и надежности при обслуживании оборудования на основе результатов имитационного моделирования.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.01: п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления и обработки информации», п. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем».

Научную новизну диссертации представляют следующие положения, которые выносятся на защиту:

1. Формализация и постановка задачи системного подхода к обслуживанию и ремонту сложного оборудования с применением страхового фонда, состояние которого описывается процессом риска специального вида, используемого в математической теории рисков.

2. Специальное алгоритмическое обеспечение по обработке информации, содержащее вероятностные модели и алгоритмы получения результатов имитационного моделирования с использованием событийного подхода и календаря событий специального вида по трем основным влияющим факторам: а)

способу обеспечения превышения доходной части над расходной; б) долям платежей по видам ремонтных работ; в) периодичности платежей.

3. Алгоритмы для вычисления показателей эффективности по результатам имитационного моделирования в виде точечных и интервальных оценок ресурсно-затратного и финансового рисков и показателей надежности «Отказ в обслуживании» по финансовым причинам.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в создании и применении математического и алгоритмического обеспечения, а также в реализации программного комплекса в виде двух программ для исследования эффективности ремонтных работ сложного оборудования с получением практических рекомендаций. Созданный программный комплекс апробирован на различных исходных данных, характеризующих обслуживание и ремонт оборудования с использованием страхового фонда. Получен акт об использовании результатов диссертационной работы в ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения». Результаты диссертационного исследования, включающие методы, алгоритмы и программное обеспечение, внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского» с получением акта об использовании этих результатов.

Методы исследования и достоверность результатов. Результаты и выводы диссертационной работы основаны на применении методов системного анализа, имитационного моделирования, теории вероятностей и математической статистики, а также методов теории рисков. Для реализации программного обеспечения вычисления показателей эффективности используется язык программирования пакета MATLAB. Достоверность результатов, полученных в ходе проведения комплексного исследования показателей эффективности ремонтных работ по различным исходным данным, подтверждена их сравнением с результатами, полученными при тестировании.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: международная НПК «Коммуникационные технологии: социально-экономические и информационные аспекты» (Иркутск, 2018); международная НПК молодых ученых «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК» (Иркутск, 2019); международная НПК «Цифровые технологии и системы в сельском хозяйстве» (Иркутск, 2019); международная НПК «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии» (Иркутск, 2020); XIII международная конференция «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур» (Томск, 2020); VI международная НПК «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур» (Екатеринбург, 2020); XI международная НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2020).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 15 научных работ: 1 публикация в журнале, индексируемом в базе Scopus; 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК, две из которых по заявленной специальности; два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Число публикаций без соавторов – 1.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 130 наименований. Общий объем работы составляет 133 страницы, из них 48 рисунков и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена научная и практическая новизна, представлено краткое содержание диссертационной работы по главам.

В первой главе обоснована необходимость создания математических методов и системного подхода для оценки эффективности обслуживания и ремонта сложного оборудования в процессе его эксплуатации в условиях неопределенности и риска. Приведены основные термины и определения системного анализа, технической диагностики и теории надежности. Описаны технологии обслуживания и ремонта оборудования, применяемые на практике. Сделан анализ литературных источников о необходимости и актуальности системного подхода, применения математического и алгоритмического обеспечения для исследования эффективности ремонтных работ сложного оборудования. Описан метод имитационного моделирования, который рекомендован для использования в диссертационном исследовании.

Во второй главе описано созданное математическое, алгоритмическое и программное обеспечение вычисления показателей, оценивающих эффективность обслуживания и ремонта сложного оборудования в процессе его эксплуатации. В работе рекомендована процедура обслуживания, предполагающая наличие страхового фонда, который выполняет две функции: 1) накапливает платежи с различной периодичностью для выполнения трех видов ремонтных работ: текущих, аварийных и капитальных; 2) по мере необходимости оплачивает эти работы.

Математическое описание состояния страхового фонда в момент времени t предлагается провести на основе процесса риска специального вида ($R(t)$), используемого в математической теории риска. Для моделирования этого процесса риска предложено использовать имитационный подход, предполагающий создание моделирующей программы на основе событийного метода. Эта программа создает выборочные значения, которые затем обрабатываются по предложенному алгоритмическому обеспечению с целью получения оценок показателей эффективности ремонтных работ.

Учитывая, что в работе исследуется три вида ремонтных работ, процесс риска определен следующим образом

$$R(t) = X_0 + Y_1(t) + Y_2(t) + Y_3(t) - Y_T(t) - Y_A(t) - Y_K(t), \quad (1)$$

где X_0 – начальные средства страхового фонда; $Y_j(t)$ – суммарные накопления платежей по видам работ, ($j=1,2,3$); $Y_T(t)$ – суммарные затраты для выполнения текущих работ; $Y_A(t)$ – суммарные затраты для выполнения аварийных работ; $Y_K(t)$ – суммарные затраты для выполнения капитальных работ.

При обслуживании оборудования в процессе его эксплуатации первоначально формируется объем платежей для различных видов ремонтных работ на год (X , млн руб). Далее годовой объем платежей распределяется по видам работ

$$X^{(1)} = c_1 \cdot X, X^{(2)} = c_2 \cdot X, X^{(3)} = c_3 \cdot X; c_1 + c_2 + c_3 = 1. \quad (2)$$

Здесь c_1 – коэффициент, учитывающий долю объема платежей для выполнения текущего обслуживания; c_2 – коэффициент, учитывающий долю объема платежей для выполнения аварийного обслуживания; c_3 – коэффициент, учитывающий долю объема платежей для выполнения инвестиционного обслуживания; $X^{(j)}$ – годовые платежи в страховой фонд по видам обслуживания, ($j = 1, 2, 3$).

Стоимость одного платежа (млн руб.) в страховой фонд для j -го вида ремонтных работ с учетом (2)

$$Y_j = h_j \cdot X^{(j)} / Tg = c_j \cdot h_j \cdot X / Tg, \quad j = 1, 2, 3, \quad (3)$$

где Tg – число суток в году; h_j – периодичность платежей в страховой фонд (сутки) для j -го вида работ. Суммарные накопления платежей (млн руб.) в страховой фонд для выполнения ремонтных работ j -го вида с учетом (2) и (3) равны

$$Y_j(t) = Y_j \cdot N_j(t) = (c_j \cdot h_j \cdot X / Tg) \cdot N_j(t), \quad j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где $N_j(t)$ – число платежей в страховой фонд за время t для j -го вида работ.

Интервалы времени между ремонтными работами и затраты на их выполнение являются случайными величинами с известными законами распределения. Тогда, например, суммарные затраты на выполнение капитальных ремонтных работ равны

$$YK(t) = \sum_{i=1}^{N_k(t)} \omega_i, \quad (5)$$

где ω_i – значение затрат по i -й капитальной работе; $N_k(t)$ – число капитальных работ за время t . Аналогично (5), получены формулы для текущих ($Y_T(t)$) и аварийных ($Y_A(t)$) работ. Используя рекомендации литературных источников по теории надежности и страховой математики, в качестве законов распределения выбраны: Парето с нулевой точкой, гамма, логарифмически нормальное, Бирнбаума-Саундерса и др. Для процесса риска (1) определяется момент времени τ (сут.), когда первый раз выполняется условие:

$$R(t) < 0, \quad \tau = \min_t \{t : R(t) < 0\}. \quad (6)$$

Момент времени (6) характеризует эффективность организации ремонтных работ с точки зрения формирования платежей по их видам. Поэтому случайное событие ($\tau < T_\tau$) предлагается рассматривать как ресурсно-затратный риск и оценивать его показателем r_τ , как вероятность этого события:

$$r_\tau = P(\tau < T_\tau), \quad (7)$$

где T_τ – заданное время (сутки).

Показатель риска (7) назван ресурсно-затратным, так как он оценивает модель «Ресурсы-затраты» для ремонтных работ, связанных с процессом эксплуатации сложного оборудования. При отсутствии финансовых средств в страховом фонде возникает риск невыполнения этих работ.

При использовании имитационного моделирования для величины (6), когда

$$0 < \tau \leq T_m, \quad (8)$$

создается выборка объема n , которая в дальнейшем обрабатывается. Здесь T_m – максимальное время создания реализации процесса (1) при имитационном моделиро-

вании $T_\tau \leq T_m$. Полученная выборка имеет вид:

$$T = (\tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n). \quad (9)$$

На практике более широко используется двухфакторная модель, когда помимо вероятности негативного события (7) учитываются финансовые последствия от этого события. В связи с этим, в работе введено понятие финансового риска вида

$$R_\phi = r_\tau \cdot C_R, \text{ млн руб.}, \quad (10)$$

где C_R – потери от невыполнения ремонтных работ, млн руб.; r_τ – величина (7), характеризующая ресурсно-затратный риск. Величина (10) является детерминированной и неизвестной. При имитационном моделировании она заменяется точечной оценкой

$$\tilde{R}_\phi = \tilde{R}_\tau \cdot C_R \quad (11)$$

и интервальной оценкой

$$R_1 = \tau_1 \cdot C_R, R_2 = \tau_2 \cdot C_R. \quad (12)$$

В формулах (11) и (12)

$$\tilde{R}_\tau = k_\tau / n_0, \quad (13)$$

где k_τ – число реализаций процесса (1), для которых выполняется условие ($\tau < T_\tau$), n_0 – число созданных реализаций методом имитационного моделирования;

$$\tau_1 = k_\tau / [k_\tau + (n_0 - k_\tau + 1) \cdot F_1(v_1, v_2)], \quad (14)$$

где $F_1(v_1, v_2)$ – критическое значение для F -распределения при v_1 и v_2 степенях свободы и доверительной вероятности $\gamma = 0,95$; $v_1 = 2 \cdot (n_0 - k_\tau + 1)$, $v_2 = 2 \cdot k_\tau$;

$$\tau_2 = (k_\tau + 1) \cdot F_2(v_3, v_4) / [n_0 - k_\tau + (k_\tau + 1) \cdot F_2(v_3, v_4)], \quad (15)$$

где $F_2(v_3, v_4)$ – критическое значение для F -распределения при v_3 и v_4 степенях свободы и доверительной вероятности $\gamma = 0,95$; $v_3 = 2 \cdot (k_\tau + 1)$, $v_4 = 2 \cdot (n_0 - k_\tau)$. Значение (13) является точечной оценкой величины (7), а (τ_1, τ_2) ее интервальной оценкой.

Преимуществом финансового риска является то, что он оценивает средний размер потерь, связанный с невозможностью выполнения ремонтных работ оборудования по причине отсутствия финансовых средств. При этом необходимо уметь определять потери от невыполнения этих работ. Величина потерь оценивается экспертами и рассматривается как дискретная случайная величина с двумя значениями: C_R с вероятностью r_τ (7); 0 с вероятностью $(1 - r_\tau)$. В этом случае величина (10) является математическим ожиданием величины потерь, которую оценили эксперты. Величины (11) и (12) являются точечными и интервальными оценками этого математического ожидания по результатам имитационного моделирования.

В работе на основе выборки (9) предложены дополнительные показатели. Это позволяет более комплексно оценить эффективность ремонтных работ сложного оборудования. В этом случае величины (6) в выборке (9) рассматриваются как моменты времени, когда происходит «Отказ в обслуживании» оборудования. Обслуживание связано с ремонтными работами, а отказ происходит по причине отсутствия их финансового обеспечения. Элементы выборки (9) предложено рассматривать как «наработки» процесса ремонта оборудования, поэтому их предлагается обрабатывать, используя численные модели показателей надежности.

Модели названы численными (в отличие от аналитических), так как они обрабатывают числовую информацию, в нашем случае выборочные значения (9).

Оценками показателей надежности являются: 1) численная вероятность безотказной работы; 2) численная средняя наработка; 3) численный гамма-процентный ресурс; 4) численная вероятность безотказной работы остаточного ресурса; 5) численный средний ресурс остаточного ресурса; 6) численный гамма-процентный остаточный ресурс. Приведем первые три показателя (в диссертации приведены все шесть показателей): а) численная вероятность безотказной работы

$$P_r(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau < 0 \\ k_{j-1} + (\tau - t_{j-1})(k_j - k_{j-1})J / b, & 0 \leq \tau < b \\ 0, & \tau \geq b \end{cases}; \quad (16)$$

б) численная средняя наработка:

$$\bar{t}_r = \int_0^b P_r(\tau) d\tau = \frac{b}{J} (0,5 + \sum_{j=1}^J k_j), \text{ сут.}; \quad (17)$$

в) численный гамма-процентный ресурс

$$P_r(\tau) = \gamma \rightarrow t_r(\gamma) = t_{j-1} + \frac{(\gamma - k_{j-1}) \cdot b}{k_j - k_{j-1}} \cdot \frac{1}{J}, \text{ сут.} \quad (18)$$

Здесь b – максимальное выборочное значение; J – число интервалов одинаковой длины: $\Delta t = b / J$; $t_j = j \cdot \Delta t$, $j = \overline{1, J}$, $t_0 = 0$; $t_J = b$; $k_{j-1} \geq \gamma > k_j$, $j = \overline{1, J}$; γ – вероятность, для которой определяется гамма-процентный ресурс.

На основе разработанного математического обеспечения, описанного выше, создано специальное алгоритмическое обеспечение и программный комплекс (ПК) для исследования показателей эффективности ремонтных работ оборудования на языке программирования пакета MATLAB.

Специальное алгоритмическое обеспечение реализует событийный подход на основе календаря событий, содержит алгоритмы моделирования затрат для выполнения ремонтных работ и интервалов времени между этими работами и алгоритмы создания выборочных значений моментов времени, когда финансовые ресурсы для выполнения ремонтных работ оборудования отсутствуют (9), которые затем обрабатываются по предложенным вычислительным алгоритмам. Созданное обеспечение позволило реализовать системный подход к исследованию эффективности обслуживания и ремонта сложного оборудования, не зависящего от числа событий. В данном исследовании используется семь событий, но их число можно менять, добавляя события и модули их обработки. При этом будут изменяться выборочные значения (9) с сохранением алгоритмов вычисления показателей эффективности.

На рисунке 1 приведен фрагмент блок-схемы моделирующей программы, описывающий работу календаря событий, j – код события. События 1, 2 и 3 описывают процессы использования страхового фонда: переменные R_t , Z_T , Z_A , Z_K описывают состояние страхового фонда и затраты на выполнение текущих, аварийных и капитальных работ, соответственно. Если значение R_t не положительное, то формируется выборка (9) (блок Г), иначе планируется следующее событие. Переменные t_T , t_A , t_K описывают интервалы между работами; SE – массив, где хранится время свершения событий. События 4, 5 и 6 описывают процессы пополнения страхового фонда, событие 7 ответственно за пополнение начального значения X_0 .

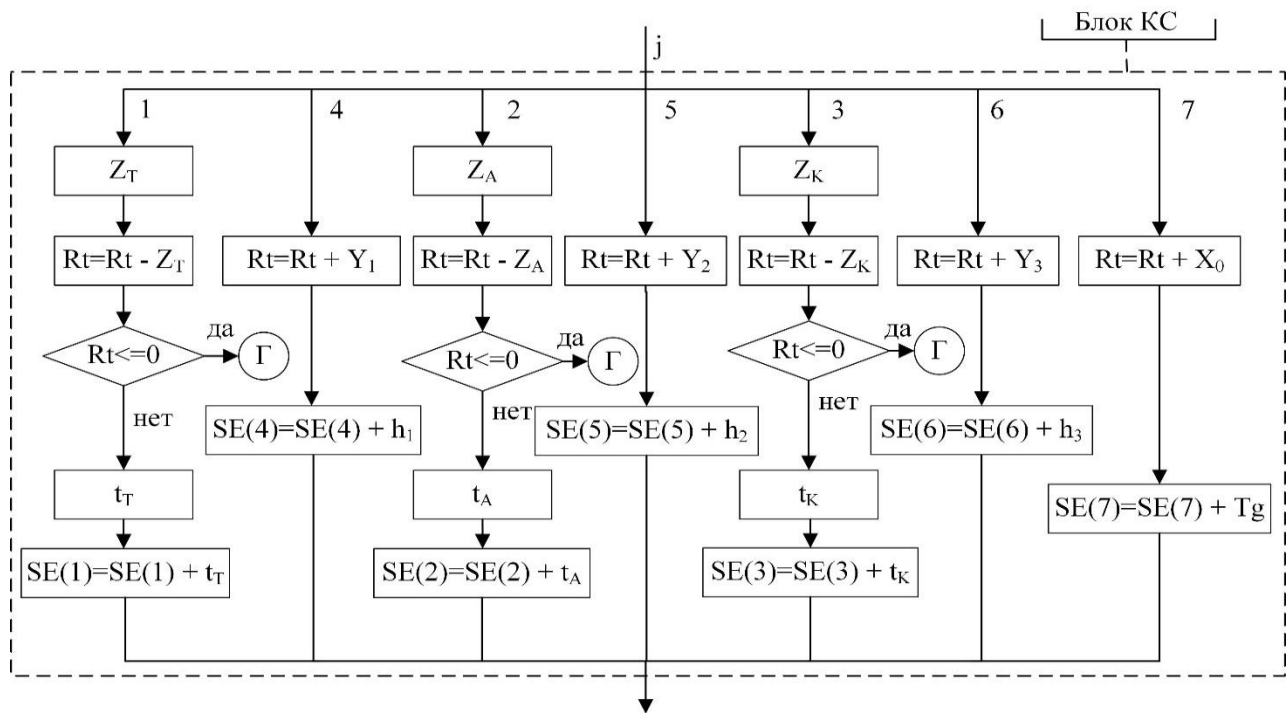


Рис. 1. Фрагмент блок-схемы моделирующей программы

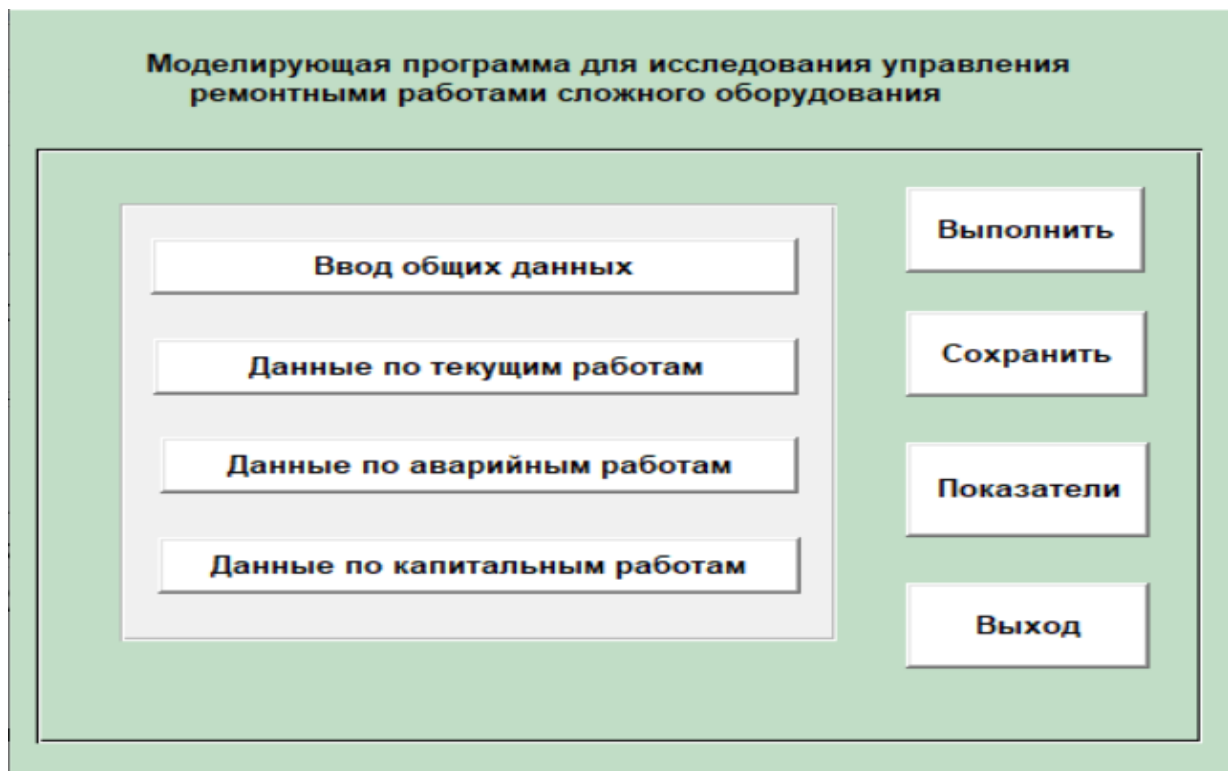


Рис. 2. Главное окно моделирующей программы

ПК содержит две связанные программы, которые подробно описаны в диссертации, включая вопросы тестирования.

На рисунке 2 приведено главное окно основной моделирующей программы, содержащее различные кнопки:

1. Кнопка «Ввод общих данных» для ввода общих исходных данных;
2. Три кнопки по вводу данных для вероятностных моделей по видам ремонтных работ: текущие, аварийные, капитальные;

3. Кнопка «Выполнить» для запуска работы моделирующей программы;
4. Кнопка «Сохранить» – позволяет сохранить результаты работы в файле «data.txt»;
5. Кнопка «Показатели» позволяет вызвать окно для ввода данных этих показателей;
6. Кнопка «Выход» завершает работу программы.

На рисунке 3 приведены реализации процесса (1), полученные моделирующей программой: а) выборочное значение (б) имеется, б) – это значение отсутствует.

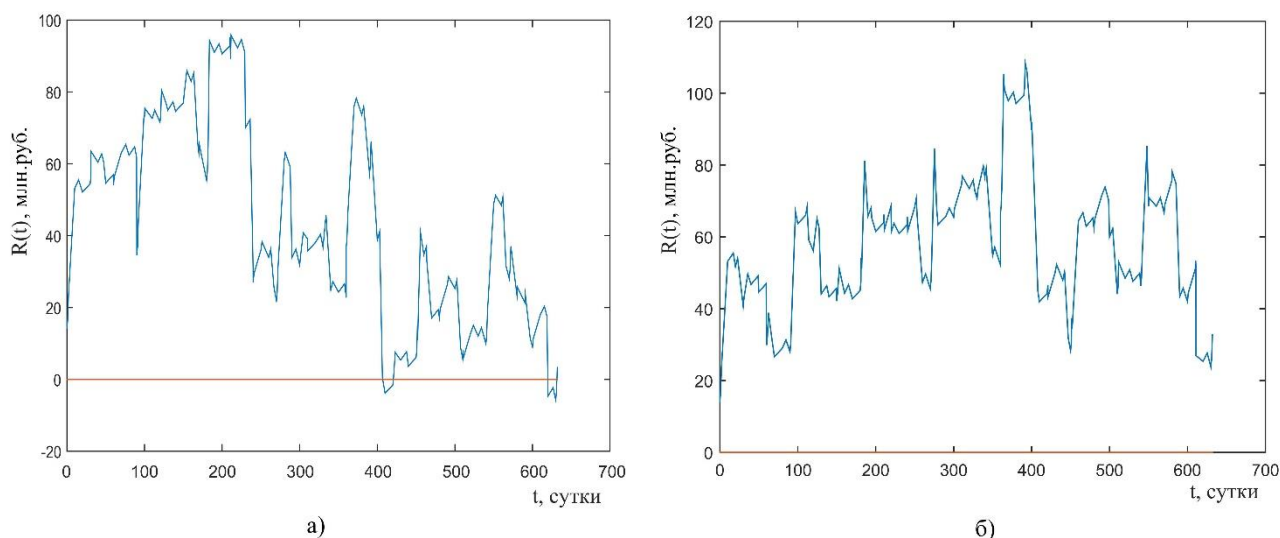


Рис. 3. Реализации процесса риска (1)

В третьей главе проведена апробация созданного математического и программного обеспечения. Исходными данными при исследовании эффективности ремонтных работ на основе процесса риска (1) являются: 1) c_1, c_2, c_3 – доли объема платежей (2); 2) h_1, h_2, h_3 – периодичность платежей (3), сут.; 3) X – годовой объем платежей, который надо распределить по видам ремонтных работ (2), млн руб.; 4) X_0 – начальные средства страхового фонда (1), млн руб.; 5) C_R – потери от невыполнения ремонтных работ (11), млн руб.; 6) вероятностные модели для интервалов времени между ремонтными работами; 7) вероятностные модели для затрат при выполнении ремонтных работ (5). Потери от невыполнения ремонтных работ приняты в размере 250 млн руб.; значение $T_m = 720$ сут.; число смоделированных реализаций (n_0) равно 20000. Вероятностные модели описываются двухпараметрическими законами распределения, математическими ожиданиями и коэффициентами вариации. Знание математического ожидания и коэффициента вариации позволяет методом моментов находить значения параметров выбранного закона распределения. Программное обеспечение создано таким образом, что виды законов распределения по типам ремонтных работ можно изменять.

В таблице 1 приведены законы распределения и их числовые характеристики для интервалов времени между видами работ и затратам на эти работы: m_i, m_z – математические ожидания, k_v – коэффициенты вариации. Выбор законов распределения и их числовых характеристик осуществлено с помощью экспертов и литературных источников.

Работы	Интервалы времени, сут.		Затраты, млн руб.	
Текущие	Бирнбаума-Саундерса		Логнормальное	
	$mi=15,0$	$k_v=0,20$	$mz=3,5$	$k_v=0,20$
Аварийные	Вейбулла		Парето	
	$mi=45,0$	$k_v=0,30$	$mz=10,0$	$k_v=1,50$
Капитальные	Гамма		Нормальное	
	$mi=60,0$	$k_v=0,25$	$mz=20,0$	$k_v=0,15$

При выбранных значениях математических ожиданий (табл. 1) величины средних расходов на ремонтные работы по их видам (текущие, аварийные, капитальные) за год равны:

$$P_j = Tg \cdot mz_j / mi_j, j = 1, 2, 3. \quad (19)$$

С учетом (19) и данных таблицы 1, величины этих расходов равны:

$$P_1 = 84 \text{ млн руб.}, P_2 = 80 \text{ млн руб.}, P_3 = 120 \text{ млн руб.} \quad (20)$$

В сумме эти расходы равны годовому объему платежей X . Тогда доли платежей по видам ремонтных работ (2)

$$c_j = P_j / X, j = 1, 2, 3; X = \sum_{j=1}^3 P_j. \quad (21)$$

Если подставить в формулу (21) значения (20), то получим такие доли платежей:

$$c_1 = 0,296; c_2 = 0,282; c_3 = 0,422. \quad (22)$$

Величины (3) с учетом (21) равны: $Y_j = h_j \cdot P_j / Tg, j = 1, 2, 3.$ (23)

Величины (4) за год равны: $Y_j(Tg) = Y_j \cdot Tg / h_j, j = 1, 2, 3.$ (24)

С учетом (23) и (24), величины поступления платежей за год (доходы) и величины расходов по каждому виду ремонтных работ в среднем равны между собой

$$Y_j(Tg) = P_j, j = 1, 2, 3. \quad (25)$$

В теории рисков доказано, что доходная часть в процессе риска должна быть в среднем больше расходной. В нашем случае должно выполняться условие

$$X_0 + \sum_{j=1}^3 Y_j(Tg) > \sum_{j=1}^3 P_j. \quad (26)$$

В диссертационной работе исследуются три фактора: 1) влияние способа обеспечения превышения доходной части над расходной (26); 2) влияние периодичности платежей (h_j); 3) влияние долей платежей по видам ремонтных работ (c_j).

При этом предлагается связать периодичность платежей (h_j) с математическими ожиданиями интервалов времени между видами работ (mi_j , табл. 1)

$$q_j = h_j / mi_j, j = 1, 2, 3. \quad (27)$$

В диссертационном исследовании проведено 30 вычислительных экспериментов с моделирующей программой, в результате которых были получены выборочные значения моментов времени (6), когда финансовые ресурсы для выполнения ремонтных работ оборудования отсутствуют. В результате этих экспериментов получено 120 вариантов результатов оценок показателей эффективности, приведенных в таблицах и рисунках диссертации. На основании этих исследований получены практически важные результаты и рекомендации. Часть этих результатов приведено в автореферате (табл. 2, табл. 3, рис. 4, рис. 5). В таблице 2 в вариантах A, C, D, E превышение доходной части над расходной осуществляется за счет ежегодного начального значения страхового фонда X_0 .

Результаты расчетов точечной и интервальной оценок рисков Таблица 2

V_1	V_2	T_τ , сут.	k_τ	\tilde{R}_τ	τ_1	τ_2	\tilde{R}_ϕ	R_1	R_2
A	a	30	45	0,002	0,002	0,003	0,563	0,432	0,721
		90	1303	0,065	0,062	0,068	16,288	15,575	17,023
		180	2973	0,149	0,145	0,153	37,163	36,131	38,213
		360	5442	0,272	0,267	0,277	68,025	66,731	69,331
	b	30	33	0,002	0,001	0,002	0,412	0,302	0,551
		90	653	0,033	0,031	0,035	8,162	7,652	8,698
		180	1668	0,083	0,080	0,087	20,850	20,051	21,671
		360	3583	0,179	0,175	0,184	44,788	43,675	45,917
B	a	30	88	0,004	0,004	0,005	1,100	0,915	1,313
		90	2538	0,127	0,123	0,131	31,725	30,761	31,709
		180	4514	0,226	0,221	0,231	56,425	55,211	57,654
		360	6637	0,332	0,326	0,337	82,962	81,592	84,342
	b	30	85	0,004	0,004	0,005	1,063	0,881	1,272
		90	2083	0,104	0,101	0,108	26,038	25,154	26,943
		180	3638	0,182	0,177	0,186	45,475	44,356	46,611
		360	5212	0,261	0,255	0,266	65,150	63,874	66,439
C	a	30	63	0,003	0,003	0,004	0,787	0,632	0,971
		90	1413	0,071	0,068	0,074	17,663	16,923	18,425
		180	3114	0,156	0,151	0,160	38,925	37,874	39,995
		360	5632	0,282	0,276	0,287	70,400	69,092	71,720
	b	30	38	0,002	0,001	0,002	0,475	0,356	0,622
		90	684	0,034	0,032	0,036	8,550	8,028	9,097
		180	1692	0,085	0,081	0,088	21,150	20,346	21,977
		360	3523	0,176	0,172	0,181	44,038	42,932	45,160
D	a	30	28	0,001	0,001	0,002	0,350	0,249	0,480
		90	1015	0,051	0,048	0,053	12,688	12,055	13,344
		180	2801	0,140	0,136	0,144	35,013	34,007	36,038
		360	5119	0,256	0,251	0,261	63,988	62,719	65,269
	b	30	25	0,001	0,001	0,002	0,313	0,217	0,436
		90	531	0,027	0,025	0,028	6,638	6,177	7,124
		180	1581	0,079	0,076	0,082	19,762	18,983	20,565
		360	3352	0,168	0,163	0,172	41,900	40,817	43,001
E	a	30	77	0,004	0,003	0,005	0,963	0,790	1,163
		90	1112	0,056	0,053	0,058	13,900	13,239	14,585
		180	3095	0,155	0,151	0,159	38,688	37,639	39,755
		360	5514	0,276	0,271	0,281	68,925	67,625	70,237
	b	30	36	0,002	0,001	0,002	0,450	0,334	0,594
		90	567	0,028	0,026	0,030	7,088	6,611	7,589
		180	1691	0,085	0,081	0,088	21,137	20,333	21,964
		360	3561	0,178	0,174	0,183	44,513	43,403	45,640

Рассмотрены два случая, когда X_0 равны 5 и 10 процентов относительно годового объема платежей;

$X = 284,0$ млн руб.: a) $X_0 = 14,2$ млн руб.; b) $X_0 = 28,4$ млн руб.:

1) вариант A, доли платежей равны (22), периодичность платежей с учетом (27) равна $h_1 = 10$ сут. ($q_1 = 0,67$), $h_2 = 30$ сут. ($q_2 = 0,67$), $h_3 = 90$ сут. ($q_3 = 1,50$); 2) вариант B, превышение дохода осуществляется за счет увеличения годового объема

платежей X , $X_0 = 0$, доли и периодичность платежей, как в варианте A . В этом варианте также рассмотрены два случая, когда увеличение равно 5 и 10 процентов: a) $X = 298,2$ млн руб.; b) $X = 312,4$ млн руб.; 3) вариант C , доли платежей одинаковые: $c_1 = 0,333$; $c_2 = 0,333$; $c_3 = 0,334$; периодичность платежей как в варианте A ; 4) вариант D , доли платежей равны (22); периодичность платежей с учетом (27) равна $h_1 = 20$ сут. ($q_1 = 1,33$), $h_2 = 60$ сут. ($q_2 = 1,33$), $h_3 = 90$ сут. ($q_3 = 1,50$); 5) вариант E , доли платежей равны (22), периодичность платежей с учетом (27) равна $h_1 = 15$ сут. ($q_1 = 1,0$), $h_2 = 45$ сут. ($q_2 = 1,0$), $h_3 = 60$ сут. ($q_3 = 1,0$).

Рассмотренные варианты промоделированы для четырех значений величины T_r (7): 30 сут., 90 сут., 180 сут., 360 сут. Потери от невыполнения ремонтных работ (11) приняты в размере 250 млн.руб. Число создаваемых реализаций процесса риска (1) методом имитационного моделирования (n_o) равно 20000.

В таблице 2 приведены полученные в результате вычислительного эксперимента значения точечных и интервальных оценок ресурсно-затратного и финансового рисков, V_1 и V_2 – разновидности расчетов по предложенным вариантам. Анализ значений таблицы 2 и дополнительных результатов, приведенных в диссертации, позволяют сделать выводы о том, что с точки зрения уменьшения ресурсно-затратного и финансового рисков: 1) превышение доходной части над расходной необходимо осуществлять за счет ежегодного начального значения страхового фонда X_0 ; 2) доли платежей должны зависеть от вида ремонтных работ и определяться по формуле (21). Для выбранных исходных данных они равны (22); 3) периодичность платежей в страховой фонд должна зависеть от вида ремонтных работ и от математических ожиданий интервалов времени между этими работами (27). С учетом этих рекомендаций наилучшим является вариант D , что подтверждается и оценками значений показателей рисков.

Отметим, что в варианте E коэффициенты пропорциональности (27) равны между собой, но оценки ресурсно-затратного и финансового рисков оказались больше, чем у варианта D . Это связано с тем, что величины T_r кратны 10, а при выбранных математических ожиданиях интервалов времени между видами работ (mi_j , табл. 1) и равных коэффициентов пропорциональности (27) интервалы платежей по варианту E не кратны 10. В варианте D коэффициенты пропорциональности (27) наиболее равны между собой, а интервалы между платежами кратны 10.

Дополнительно можно утверждать, что с увеличением начального значения ресурсно-затратный риск уменьшается, а с увеличением времени T_r увеличивается. Последние утверждения являются логически очевидными, но анализ методом имитационного моделирования позволяет количественно оценить эти изменения.

На рисунках 4 и 5 приведены гистограммы частот на 30 интервалах величины τ (6), когда первый раз процесс риска (1) становится меньше нуля. Гистограммы получены, когда $X_0 = 14,2$ млн руб., а $T_r = 360$ сут.: рисунок 3 – для варианта E , рисунок 4 – для варианта D . Для варианта E гистограмма имеет 6 выбросов, а для варианта D четыре с периодичностью около 90 суток. Особенно большие выбросы наблюдаются с периодичностью 180 суток. Это связано с тем, что каждые 180 суток в этом варианте все три платежа в страховой фонд совпадают. Объем выборки для

варианта E равен 3561, оценка ресурсно-затратного риска (13) равна 0,178. Для варианта D объем выборки равен 3352, оценка ресурсно-затратного риска (13) равна 0,168. Эти данные также подтверждают, что вариант D более предпочтителен, чем вариант E и другие рассмотренные варианты.

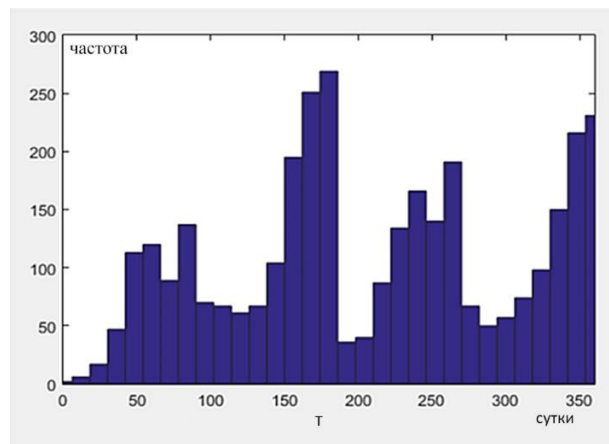
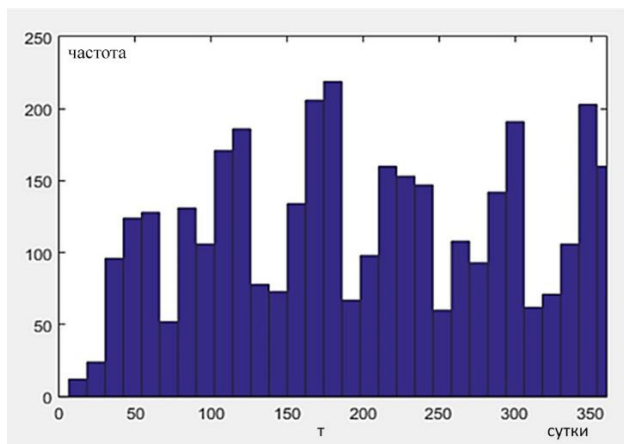


Рис. 4. Гистограмма частот для варианта E

Рис. 5. Гистограмма частот для варианта D

Значения численных показателей надежности

Таблица 3

V_1	V_2	T_r , сут.	k_r	Показатель	Значение, сут.
D	a	90	1015	\bar{t}_r	62,966
				$t_r(\gamma)$	33,639
		180	2801	\bar{t}_r	120,355
				$t_r(\gamma)$	43,237
		360	5119	\bar{t}_r	195,224
				$t_r(\gamma)$	50,243
	b	90	531	\bar{t}_r	61,912
				$t_r(\gamma)$	31,163
		180	1581	\bar{t}_r	121,683
				$t_r(\gamma)$	42,940
		360	3352	\bar{t}_r	209,112
				$t_r(\gamma)$	52,048
E	a	90	1112	\bar{t}_r	54,828
				$t_r(\gamma)$	27,531
		180	3095	\bar{t}_r	108,701
				$t_r(\gamma)$	36,598
		360	5514	\bar{t}_r	181,691
				$t_r(\gamma)$	41,453
	b	90	567	\bar{t}_r	52,278
				$t_r(\gamma)$	28,214
		180	1691	\bar{t}_r	112,267
				$t_r(\gamma)$	37,116
		360	3561	\bar{t}_r	198,994
				$t_r(\gamma)$	45,348

В таблице 3 приведены два показателя надежности, полученные по численным моделям для вариантов D и E , рассмотренных выше: 1) \bar{t}_r – средняя наработка (17); 2) $t_r(\gamma)$ – гамма-процентный ресурс (18) при вероятности 0,95; для этих вариантов число интервалов $J = 30$. По максимуму численных значений показателей надежности предпочтение следует отдать варианту D . Значения показателей надежности подтверждают полученные выше выводы.

Дополнительно проведено моделирование системы обслуживания и ремонта оборудования, которое осуществляется сотрудниками управления информатизации ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», описанное в диссертации. Результаты моделирования подтвердили рекомендации диссертационного исследования. Получен акт об использовании результатов диссертационной работы от этого университета.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Выполнены формализация и постановка задачи системного подхода к обслуживанию и ремонту сложного оборудования с применением страхового фонда, выполняющего функции по накоплению платежей с различной периодичностью и по оплате этих работ. Для математического описания состояния этого фонда предложено использовать процесс риска специального вида.

2. Выбраны вероятностные модели, используемые для оценки компонент процесса риска. Эти модели описывают интервалы времени между ремонтными работами и затраты на их выполнения. В качестве этих моделей выбраны: распределение Парето с нулевой точкой, гамма распределение, распределение Бирнбаума-Саундерса и др.

3. Создано специальное алгоритмическое обеспечение по обработке информации, содержащее вероятностные модели и алгоритмы получения результатов имитационного моделирования с использованием событийного подхода и календаря событий специального вида по трем основным влияющим факторам: а) способу обеспечения превышения доходной части над расходной; б) долям платежей по видам ремонтных работ; в) периодичности платежей.

4. Разработаны алгоритмы для вычисления показателей эффективности по результатам имитационного моделирования в виде точечных и интервальных оценок ресурсно-затратного и финансового рисков и показателей надежности «Отказ в обслуживании» по финансовым причинам.

5. Разработан программный комплекс, основанный на моделирующей программе, использующей событийный подход, позволяющий проводить вычислительные эксперименты и реализующий разработанные методы и алгоритмы оценки показателей эффективности, характеризующих обслуживание и ремонт сложного оборудования. Программный комплекс реализован на языке программирования пакета MATLAB. Имеются два свидетельства о государственной регистрации созданных программ.

6. Используя одну из программ, проведено тестирование модуля, необходимого для моделирующей программы. Тестирование показало, что математическое и программное обеспечение для оценки показателей надежности обладает необходимой точностью и может быть рекомендован для основной программы моделирования.

7. Сформулированы четыре задачи комплексного исследования эффективности ремонтных работ сложного оборудования. Первые три задачи в качестве показателей сравнения вариантов используют оценки ресурсно-затратного и финансового рисков, четвертая задача – оценки показателей надежности «Отказ в обслуживании». Это позволило впервые провести комплексное исследование на основании 30 вычислительных экспериментов с моделирующей программой и 120 вариантов оценок показателей эффективности и получить практически важные результаты: превышение доходной части над расходной необходимо делать за счет начального годового значения страхового фонда; периодичность платежей должна зависеть от вида ремонтных работ и исходных данных (27); доли платежей должны быть различными и определяться по формуле (21).

8. По результатам диссертационного исследования получен акт об использовании при планировании финансово-хозяйственной деятельности обслуживания и ремонта оборудования управления информатизации ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» и акт о внедрении в учебный процесс ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, индексируемых в базе Скопус:

1. Hoang N. A. Research on the efficiency of equipment repair works based on the random risk process / Y. M. Krakovsky, N. A. Hoang // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1680. – 012026. doi:10.1088/1742-6596/1680/1/012026

В изданиях, рекомендованных ВАК:

2. Хоанг, Н.А. Оценка ресурсно-затратного риска при организации ремонтных работ сложного роботизированного оборудования / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2019. – № 4. – С. 29 – 35. DOI: doi.org/10.17308/sait.2019.4/2678.

3. Хоанг, Н.А. Оценка показателей «Отказ в обслуживании» при организации ремонтных работ многокомпонентного оборудования / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2020. – № 1. – С. 110 – 118. DOI: <https://doi.org/10.17308/sait.2020.1/2597>

4. Хоанг, Н.А. Моделирование ремонтных работ оборудования на основе случайного процесса риска / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // Прикладная информатика. – 2020. – Т.15. – № 6. – С. 5–15. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-6-5-15.

5. Хоанг, Н.А. Численное исследование показателей надежности оборудования по данным малого объема / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 1 (61). – С. 28 – 34.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616276 от 22 мая 2019 г. Программный комплекс для численной оценки показателей надежности оборудования / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2019.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665935 от 03 декабря 2019 г. Моделирующая программа для исследования управления ремонтными работами сложного оборудования / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2019.

В других изданиях:

8. Хоанг, Н.А. Программное обеспечение моделирования времени наработки оборудования по экспериментальным значениям / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // Вопросы естествознания. – 2018. – № 1 (15). – С. 18 – 23.
9. Хоанг, Н.А. Математическое обеспечение оценки показателей надежности технологического оборудования / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2018. – № 27. – С. 51 – 57.
10. Хоанг, Н.А. Программное обеспечение для моделирования исходных данных как случайных величин / Н.А. Хоанг // Материалы международной студенческой научно-практической конференции «Коммуникационные технологии: социально-экономические и информационные аспекты». – 2018. – С. 55 – 58.
11. Хоанг, Н.А. Моделирующая программа для исследования управления ремонтными работами сложного оборудования / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // BAIKAL LETTER DAAD. – 2019. – №1. – С. 64 – 72.
12. Хоанг, Н.А. Программное обеспечение численной оценки показателей надежности оборудования / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК». – 2019. – С.145 – 153.
13. Хоанг, Н.А. Программное обеспечение вычисления показателей риска для оценки эффективности ремонтных работ / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2020. – № 35. – С. 44 – 51.
14. Хоанг, Н.А. Математическое описание страхового фонда на основе случайного процесса риска / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг // Материалы XIII международной конференции «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур». – 2020. – С. 4 – 5.
15. Хоанг, Н.А. Исследование эффективности ремонтных работ железнодорожной инфраструктуры на основе страхового фонда / Ю. М. Краковский, Н. А. Хоанг // Молодая наука Сибири. – 2020. – №4(10). С. 210 – 215.