

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ  
ЭКОНОМИКИ/MATHEMATICAL, STATISTICAL AND INSTRUMENTAL METHODS OF ECONOMICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42>

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ПРЕДИКТИВНОГО  
ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Научная статья

Якушин Д.И.<sup>1</sup>, Денисов В.Н.<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-1145-7466;

<sup>1,2</sup>Тулеский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, Тула, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (vnik612[at]yandex.ru)

**Аннотация**

В данной статье представлен вариант имитационной модели, предназначенной для оценки экономической эффективности внедрения систем предиктивного обслуживания (*PdM*) взамен системы превентивного обслуживания (*PvM*) на современном промышленном предприятии. Разработанная модель основана на методах стохастического моделирования.

Особое внимание уделено учету таких критически важных факторов, как: частота ложных срабатываний, влияние человеческого фактора, специфические характеристики различных типов промышленного оборудования. В качестве показателей эффективности в модели рассматривались количество отказов оборудования, время простоя, затраты на реализацию стратегий обслуживания.

Имитационная модель была реализована на языке программирования *Python*.

**Ключевые слова:** техническое обслуживание оборудования, превентивное обслуживание, предиктивное обслуживание, имитационное моделирование, стохастическое моделирование, экономическая эффективность.

SIMULATION MODEL FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF IMPLEMENTING A PREDICTIVE  
MAINTENANCE SYSTEM FOR EQUIPMENT

Research article

Yakushin D.I.<sup>1</sup>, Denisov V.N.<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-1145-7466;

<sup>1,2</sup>Tula Branch of Plekhanov Russian University of Economics, Tula, Russian Federation

\* Corresponding author (vnik612[at]yandex.ru)

**Abstract**

This article presents a simulation model designed to evaluate the economic efficiency of implementing predictive maintenance (*PdM*) systems to replace preventive maintenance (*PvM*) systems in modern industrial enterprises. The developed model is based on stochastic modelling methods.

Particular attention is paid to such critical factors as: false alarm frequency, human factor influence, specific characteristics of various types of industrial equipment. The model takes into account the number of equipment failures, downtime, and maintenance strategy implementation costs as performance indicators.

The simulation model was executed in the *Python* programming language.

**Keywords:** equipment maintenance, preventive maintenance, predictive maintenance, simulation modelling, stochastic modelling, economic efficiency.

**Введение**

Современные промышленные предприятия в условиях жесткой конкурентной борьбы сталкиваются с необходимостью повышать эффективность производственных процессов [1], [4]. Это, в частности, может быть достигнуто за счет сокращения затрат на эксплуатацию оборудования, минимизации времени его простоя. Существующие традиционные стратегии обслуживания оборудования такие как реактивная (ремонт после отказа) и превентивная (*Preventive Maintenance*, *PvM*) (проведение планового технического обслуживания (ТО)) являются малоэффективными. Это связано с избыточными затратами на плановое обслуживание и ремонты, а также с большими потерями от внеплановых (аварийных) простоев оборудования.

Предиктивное обслуживание (*Predictive Maintenance*, *PdM*), основанное на анализе данных *IoT*-датчиков и методах машинного обучения, предлагает принципиально другой подход [7]. Оно ориентировано на прогнозирование отказов на ранних стадиях. Предиктивное обслуживание позволяет повысить эффективность использования оборудования за счет сокращения незапланированных (аварийных) простоев, снижения затрат на ремонты и увеличения срока службы оборудования [5].

Развертывание системы предиктивного обслуживания на производстве требует значительных инвестиций в оснащение оборудования *IoT*-датчиками, покупку специализированного программного оборудования, обучение персонала. В связи с чем возникает задача оценки эффективности внедрения системы предиктивного обслуживания оборудования.

Внедрению систем предиктивного обслуживания оборудования посвящено достаточно большое количество работ. Среди них можно назвать статьи Ермакова В. А., Корзун Д. Ж [2], Ларькина В. В. [3], Полякова А. А. [6], Яковлева М. В. И Шалиной А. В. [8], [9], [10].

Однако оценке экономической эффективности систем предиктивного обслуживания не было уделено должного внимания.

Целью настоящего исследования явилась разработка комплексной имитационной модели для количественной оценки экономической эффективности внедрения системы предиктивного обслуживания взамен системы превентивного обслуживания оборудования.

### Методы и принципы исследования

Разработанная имитационная модель была основана на целом ряде допущений и предпосылок:

1. В модели рассматривалось всего два типа оборудования: двигатели и насосы.
  2. Снижение времени ремонта, благодаря раннему выявлению неисправностей с помощью системы *PdM*, дифференцировалось по типам оборудования.
  3. Для системы превентивного обслуживания оборудования задавались фиксированные межремонтные интервалы, различные по типам оборудования.
  4. Каждое плановое ТО имеет свою стоимость и длительность.
  5. Предполагалось, что точность датчиков при *PdM* с течением времени не ухудшается.
  6. Отказы единиц оборудования считались независимыми событиями.
  7. Предполагалось, что все единицы оборудования одного типа изнашиваются одинаково.
  8. Задержка в поставках запчастей, необходимых для ремонта и обслуживания, отсутствует.
  9. Экономические потери от простоя зависят от типа оборудования.
- Ключевые особенности реализации моделей систем обслуживания приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Особенности реализации моделей систем обслуживания

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.1>

Превентивное обслуживание ( <i>Preventive Maintenance – PvM</i> )	Предиктивное обслуживание ( <i>Predictive Maintenance – PdM</i> )
1. Используются фиксированные интервалы ТО для каждого типа оборудования. 2. Вероятность отказа оборудования возрастает пропорционально превышению фактической наработки интервала ТО. 3. Учитывает только фактические отказы. Ложные срабатывания не учитываются	1. Интенсивность отказов не является постоянной, а адаптируется к реальной ситуации. 2. Учет ложных срабатываний системы мониторинга состояния оборудования. 3. Учитываются затраты на внедрение и эксплуатацию системы

Наступление отказов при моделировании системы предиктивного обслуживания описывалось распределением Пуассона:

$$P(k) = \frac{e^{-\lambda_{PdM}} \cdot \lambda_{PdM}^k}{k!}$$

где  $k$  — количество отказов;

$\lambda_{PdM}$  — эффективная частота (вероятность) отказов.

Эффективная частота отказов определялась по формуле:

$$\lambda_{PdM} = \lambda_{base} \times (1 - \eta_{PdM})$$

где:  $\lambda_{PdM}$  — эффективная частота (вероятность) отказов при *PdM*;

$\lambda_{base}$  — базовая частота (вероятность) отказов;

$\eta_{PdM}$  — эффективность системы *PdM*.

Эффективность системы предиктивного обслуживания  $\eta_{PdM}$  характеризует способность алгоритма корректно предсказывать отказы оборудования и представляет собой долю отказов, которую система может предотвратить:

$$\eta_{PdM} = \frac{N_{total} - N_{PdM}}{N_{total}},$$

где  $N_{total}$  — общее количество отказов без реализации системы *PdM*;

$N_{PdM}$  — количество отказов при работе *PdM*.

Данный показатель может быть определен на основе исторических данных.

Обычно значение эффективности системы предиктивного обслуживания находится в интервале от 0.5 до 0.9.

Средняя эффективность систем на основе XGBoost и вибромониторинга обычно близка к 0.7.

Адаптация эффективность системы предиктивного обслуживания производится по формуле:

$$\eta_{PdM}^{(new)} = \eta_{PdM}^{(old)} \cdot \left(1 + \frac{TP}{TP+FN}\right),$$

где  $\eta_{PdM}^{(old)}$  — значение эффективности системы до корректировки («старое» значение);

$\eta_{PdM}^{(new)}$  — значение эффективности системы после корректировки («новое» значение);

TP — корректно предсказанные отказы (True Positives),

FN — пропущенные отказы (False Negatives).

Ложные срабатывания системы предиктивного обслуживания моделировались с помощью биномиального распределения с фиксированной вероятностью:

$$X \sim \text{Binomial}(n = 1, p = p_{\text{false}}),$$

где  $X$  — переменная, характеризующая наступление ложного срабатывания.

$p_{\text{false}}$  — вероятность ложных срабатываний.

Влияние человеческого фактора на длительность обслуживания учитывалось в модели через ошибку оператора/персонала. При этом увеличивается время простоя оборудования (в данном случае на 30%):

$$t_{\text{repair}} = \begin{cases} t_{\text{base}} \times 1,3, & \text{с вероятностью } p_{\text{human}} \\ t_{\text{base}}, & \text{с вероятностью } (1 - p_{\text{human}}) \end{cases},$$

где  $p_{\text{human}}$  — вероятность ошибки персонала.

Вероятность отказов при моделировании системы PvM, задавалась линейно растущей при превышении интервала ТО:

$$p_{\text{fail}} = \min(0,9, 0,001 \times (t_{\text{oper}} - t_{\text{interval}})),$$

где  $t_{\text{oper}}$  — фактическая наработка оборудования;

$t_{\text{interval}}$  — регламентный интервал ТО;

0,9 — принятая максимальная вероятность отказов.

Вероятность отказа при соблюдении регламентных интервалов ТО принималась равной нулю в связи с тем, что плановые ТО выполняются до наступления критического износа. Таким образом, при  $t_{\text{oper}} < t_{\text{interval}}$  износ не достигает порога, ведущего к отказу.

При описании системы превентивного обслуживания наступление отказов моделировалось по биномиальному закону.

Ключевые особенности подходов к моделированию отказов оборудованию приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Сравнение подходов к моделированию отказов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.2>

Параметр	Стратегия обслуживания	
	<i>PdM</i>	<i>PvM</i>
Тип распределения	Распределение Пуассона для реальных отказов Биномиальное распределение для ложных срабатываний	Биномиальное распределение
Влияние ТО	Неявное, через снижение интенсивности отказов	Явное (жесткие интервалы обслуживания)
Ложные срабатывания	Учитываются	Отсутствуют
Динамика износа оборудования	Непрерывная деградация	Скачкообразное (при превышении интервала обслуживания)

Время простоя при моделировании стратегии предиктивного обслуживания:

$$T_{\text{downtime}}^{\text{PdM}} = 0,8 \cdot \sum_{i=1}^n t_{\text{repair}_i},$$

где  $t_{\text{repair}_i}$  — время ремонта  $i$ -ой единицы оборудования;

0,8 — понижающий коэффициент, учитывающий уменьшение времени ремонта благодаря раннему выявлению неисправностей (определяется на основе обработки статистических данных).

Время простоя при моделировании стратегии превентивного обслуживания:

$$T_{\text{downtime}}^{\text{PvM}} = \sum_{i=1}^n (t_{\text{repair}_i} + t_{\text{inspect}_i}),$$

где  $t_{\text{inspect}_i}$  — время ТО  $i$ -ой единицы оборудования.

Ключевые особенности подходов к моделированию времени простоя оборудованию приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Сравнение подходов к моделированию времени простоя оборудования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.3>

Параметр	Стратегия обслуживания	
	<i>PdM</i>	<i>PvM</i>
Базовое время ремонта	Уменьшается на 20%. Не учитывается разная сложность ремонта для различных неисправностей.	Полное время. Не учитывается разная сложность ремонта для различных неисправностей.
Ложные срабатывания	Увеличивают простой оборудования	Не учитываются

Параметр	Стратегия обслуживания	
	<i>PdM</i>	<i>PvM</i>
Плановые ТО	Отсутствуют	Фиксированный период времени (не зависит от состояния оборудования)
Человеческий фактор	Увеличивает время на 30%	Увеличивает время на 30%

Общие затраты при реализации стратегий обслуживания складываются из затрат на ремонты ( $C_{\text{repair}}$ ), потерь от простоев ( $C_{\text{downtime}}$ ) и, в случае стратегии *PdM*, затрат на мониторинг ( $C_{\text{monitoring}}$ )

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n (C_{\text{repair}} + C_{\text{downtime}} + C_{\text{monitoring}})$$

Экономия затрат (в процентном выражении) от внедрения предиктивной системы обслуживания вместо превентивной вычислялась по формуле:

$$\Delta C = \frac{C_{\text{total}}^{\text{PvM}} - C_{\text{total}}^{\text{PdM}}}{C_{\text{total}}^{\text{PvM}}} \cdot 100\%,$$

где  $C_{\text{total}}^{\text{PvM}}$  — общие затраты при превентивном обслуживании;

$C_{\text{total}}^{\text{PdM}}$  — общие затраты при предиктивном обслуживании.

Рентабельность инвестиций во внедрение системы предиктивного обслуживания взамен системы превентивного обслуживания определялась по формуле:

$$ROI = \frac{(C_{\text{total}}^{\text{PvM}} - C_{\text{total}}^{\text{PdM}}) \cdot T - I}{I} \cdot 100\%,$$

где  $T$  — период расчета (в данном случае был принят равным 3 годам),

$I$  — инвестиции во внедрение системы *PdM*.

В качестве ключевых метрик в рассматриваемой программе для каждой стратегии обслуживания вычисляются:

1. Количество отказов оборудования.
2. Общее время простоя.
3. Суммарные затраты.

### Основные результаты

Рассматриваемая имитационная модель была реализована на языке программирования *Python* с использованием современных вычислительных библиотек.

Программа состоит из одного главного класса *MaintenanceStrategyEvaluator* с методами:

1. *load\_config* — загрузка исходных данных из файла *Excel*;
2. *simulate\_equipment\_failures* — имитация отказов в работе оборудования;
3. *predictive\_model*, *preventive\_model* — моделирование стратегий предиктивного и превентивного обслуживания соответственно;
4. *compare\_strategies* — сравнение стратегий обслуживания;
5. *visualize\_comparison* — визуализация результатов сравнения стратегий.

Укрупненная блок-схема программы приведена на рисунке 1.

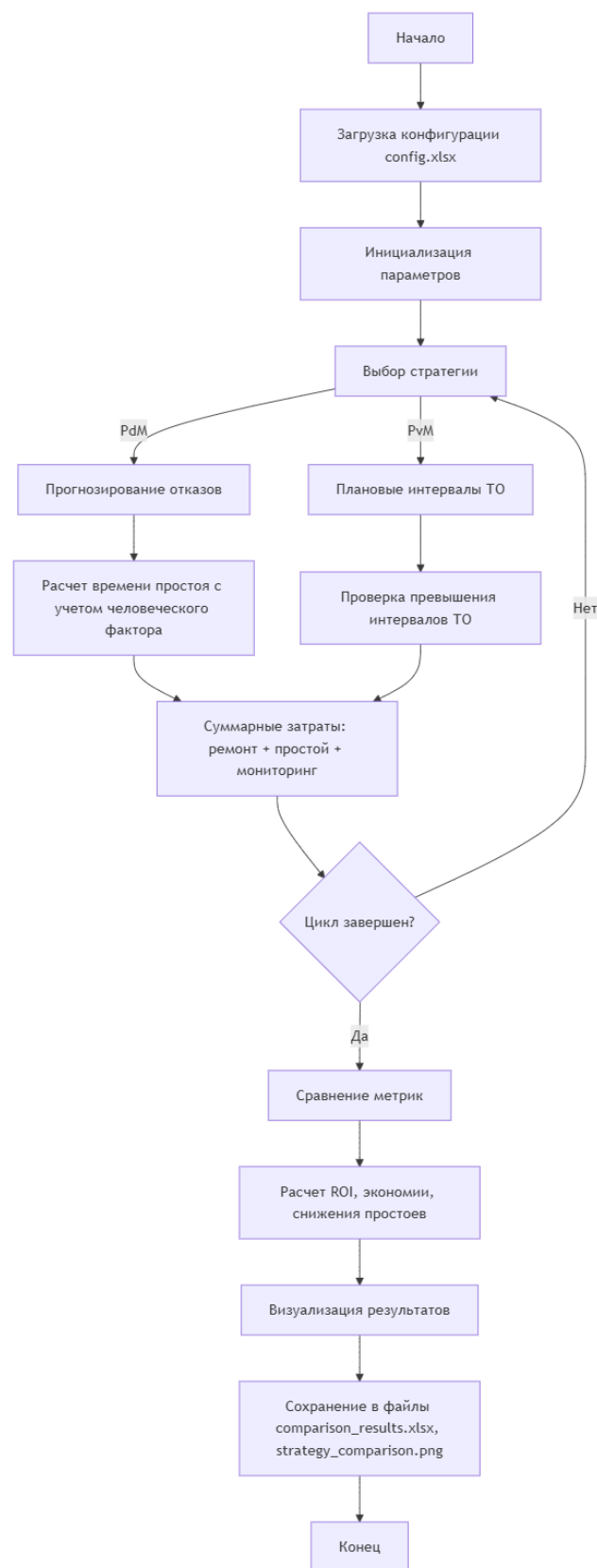


Рисунок 1 - Блок-схема программы имитационной модели  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.4>

Исходные данные для моделирования задаются в *Excel*-файле *config.xlsx*. Данный файл состоит из четырех листов:

1. Лист *Equipment* содержит параметры оборудования (рис. 2):

- id — уникальный идентификатор;
- Тип оборудования (переменная *type*);
- Базовая частота отказов (переменная *base\_failure\_rate*);
- Нарботка (часы) (переменная *operating\_hours*);
- Стоимость ремонта (переменная *repair\_cost*);

- Стоимость простоя (переменная *downtime\_cost*).

	A	B	C	D	E	F	G
1	id	Тип оборудования	Базовая частота отказов	Наработка (часы)	Стоимость ремонта	Стоимость простоя	Время ремонта, дн
2	1	pomp	0.12	2500	5000	10000	2.5
3	2	motor	0.08	1800	8000	15000	4
4	3	pomp	0.24	2000	6000	10000	3
5	4	motor	0.18	2300	7000	15000	4.5
6	5	pomp	0.2	3000	6500	10000	2
7	6	motor	0.16	1500	7300	15000	3.2
8	7	pomp	0.31	2100	8000	10000	1.5
9	8	motor	0.12	1900	9000	15000	2.5
10							

Equipment PdM\_Parameters PvM\_Parameters Parameters +

Рисунок 2 - Лист Equipment  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.5>

2. Лист *PdM\_Parameters* содержит параметры системы предиктивного обслуживания (рис. 3):

- Эффективность системы (переменная *effectiveness*);
- Вероятность ложных срабатываний (переменная *false\_alarm\_rate*);
- Затраты на внедрение (переменная *implementation\_cost*);
- Ежегодные затраты на мониторинг (переменная *monitoring\_cost*).

	A	B
1	Параметр	Значение
2	Эффективность системы	0.85
3	Вероятность ложных срабатываний	0.05
4	Затраты на внедрение	120000
5	Ежегодные затраты на мониторинг	5000
6		

Equipment PdM\_Parameters PvM\_Parameters Parameters

Рисунок 3 - Лист PdM\_Parameters  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.6>

3. Лист *PvM\_Parameters* содержит параметры системы превентивного обслуживания (рис. 4):

- Интервал ТО для насосов (переменная *pump\_interval*);
- Интервал ТО для моторов (переменная *motor\_interval*);
- Стоимость одного ТО (переменная *cost\_per\_inspection*);
- Длительность ТО (переменная *inspection\_days*).

	A	B
1	Параметр	Значение
2	Интервал ТО для насосов	2000
3	Интервал ТО для моторов	1500
4	Стоимость одного ТО	1500
5	Длительность ТО, дн	0.5
6		

Equipment PdM\_Parameters PvM\_Parameters Parameters

Рисунок 4 - Лист PvM\_Parameters  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.7>

4. *Parameters* содержит параметры, характеризующие влияние человеческого фактора на время простоя (рис. 5):

- Вероятность ошибки персонала (переменная *human\_error\_prob*);
- Увеличение времени на ремонт вследствие ошибки персонала (переменная *human\_error\_inpact*)

	A	B	C	D
1	<b>Параметр</b>	<b>Значение</b>		
2	Вероятность ошибки персонала	0.07		
3	Увеличение времени на ремонт	0.3		
4				

Equipment PdM\_Parameters PvM\_Parameters **Parameters**

Рисунок 5 - Лист Parameters  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.8>

Результаты вычислений в виде обобщающих (ключевых) показателей выводятся в консоль (рис. 6), а также по каждой итерации – в Excel-файл *comparison\_results.xlsx* (рис. 7).

Запуск сравнения стратегий обслуживания оборудования...  
Идет моделирование (может занять несколько минут)...

Результаты сравнения стратегий:  
Среднее снижение затрат: 74.57%  
Снижение времени простоя: 91.36%  
Снижение количества отказов: 86.08%  
ROI PdM за 3 года: 360.04%

Рисунок 6 - Результаты вычисления, выводимые в консоль  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.9>

	A	B	C	D	E	F	G
1	<b>pdm_total_cost</b>	<b>pvm_total_cost</b>	<b>pdm_failures</b>	<b>pvm_failures</b>	<b>pdm_downtime</b>	<b>pvm_downtime</b>	<b>pdm_capital_cost</b>
2	40000	268500	0	5	0	17.6	120000
3	65000	240000	1	4	2	15.45	120000
4	40000	343500	0	6	0	22.5	120000
5	105700	216000	2	4	3.76	14.5	120000
6	70000	236000	1	4	2.4	15	120000
7	65000	239500	1	4	2	15.5	120000
8	166700	115000	3	2	7.36	8	120000
9	62500	384500	1	7	1.6	25.2	120000
10	85700	115000	1	2	2.56	8	120000

Рисунок 7 - Результаты вычисления, выводимые в файл  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.10>

Кроме того, программа генерирует 4 графика:

1. Диаграмма сравнения общих затрат по стратегиям обслуживания (рис. 8).
2. Диаграмма сравнения времени простоя оборудования (рис. 9).
3. Гистограмма распределения соотношения количество отказов (рис. 10).
4. Гистограмма распределения экономии (рис. 11).

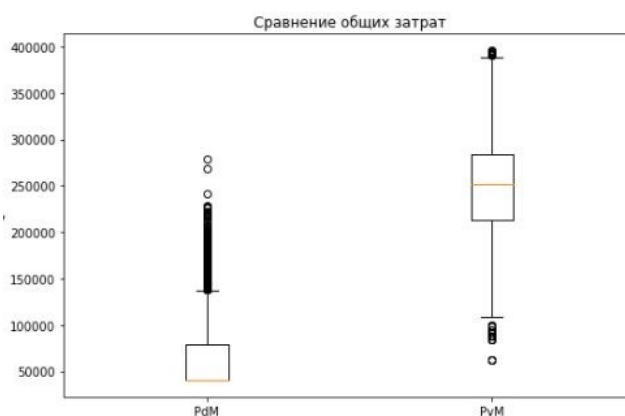


Рисунок 8 - Сравнение общих затрат по стратегиям обслуживания  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.11>

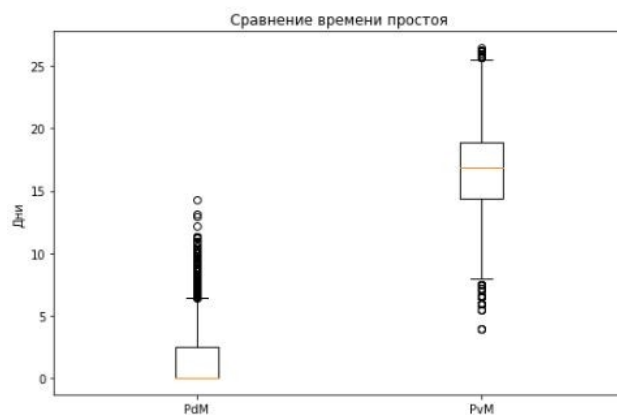


Рисунок 9 - Сравнение времени простоя оборудования  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.12>

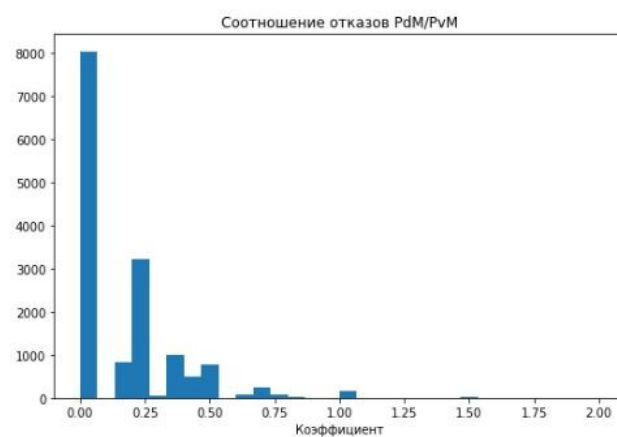


Рисунок 10 - Распределение соотношения количества отказов  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.13>

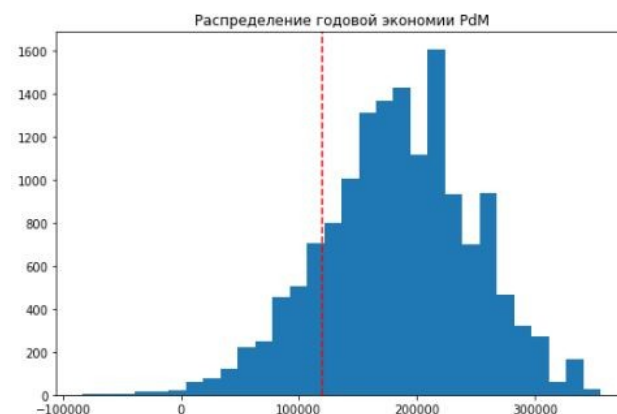


Рисунок 11 - Распределение экономии  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.42.14>

*Примечание: пунктирной красной линией отмечен уровень затрат на внедрение системы PdM*

### Заключение

Разработанная имитационная модель оценки эффективности внедрения системы предиктивного обслуживания оборудования учитывает наиболее важные реальные производственные условия функционирования (особенности



различных типов оборудования, ложные срабатывания, человеческий фактор). Разработанную на основе модели программу можно использовать для исследования чувствительности ключевых показателей эффективности системы обслуживания к изменениям различных факторов. Данная программа может быть интегрирована с промышленными IoT-системами (SCADA, MES). В качестве направлений для дальнейшего совершенствования модели можно предложить учет коррелированности отказов, нелинейности износа оборудования, сезонных факторов, а также возможность интеграции с цифровыми двойниками.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Амангельды И.С. Улучшение операционной эффективности в индустрии 4.0: подход предиктивного обслуживания / И.С. Амангельды, А.С. Бисембаев // Вестник Казахстано-Британского технического университета. — 2024. — Т. 21. — № 2. — С. 10–18.
2. Ермаков В.А. Цифровые сервисы предиктивной аналитики при обслуживании производственного оборудования / В.А. Ермаков, Д.Ж. Корзун // Цифровые технологии в образовании, науке, обществе. — 2019. — С. 73–75.
3. Ларькин В.В. К вопросу применения предиктивных моделей обслуживания сложных технических систем в процессе их эксплуатации / В.В. Ларькин [и др.] // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России. — 2022. — С. 207–212.
4. Панфилова Е.Е. Анализ готовности промышленных предприятий к цифровой трансформации бизнеса / Е.Е. Панфилова // Московский экономический журнал. — 2019. — № 10. — С. 700–709.
5. Панфилова Е.Е. Предиктивное обслуживание технологического оборудования как стратегия повышения доходности инновационно-активных организаций / Е.Е. Панфилова, К.С. Соколов // Актуальные направления повышения доходности бизнеса: проблемы, методы, решения-2019. — 2019. — С. 64–68.
6. Поляков А.А. Предиктивный анализ состояния технологического оборудования / А.А. Поляков [и др.] // Наука и бизнес: пути развития. — 2021.
7. Сайедж Е.М. Трансформация систем технического обслуживания и ремонта оборудования в условиях цифровизации / Е.М. Сайедж // Современные парадигмы социально-экономического развития России в рамках реализации национальных проектов. — 2020. — С. 121–123.
8. Яковлева М.В. Предиктивное обслуживание оборудования на протяжении его жизненного цикла как фактор сокращения расходов высокотехнологичных предприятий / М.В. Яковлева, А.В. Шалина // Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста. — 2023. — С. 186–190.
9. Яковлева М.В. Алгоритм принятия решений о внедрении предиктивного обслуживания оборудования на высокотехнологичных предприятиях / М.В. Яковлева, А.И. Шалина // Вопросы инновационной экономики. — 2023. — Т. 13. — № 1. — С. 159–172.
10. Яковлева М.В. Разработка рекомендаций по внедрению предиктивного обслуживания оборудования на высокотехнологичных предприятиях / М.В. Яковлева, А.И. Шалина // Вопросы инновационной экономики. — 2023. — Т. 13. — № 3. — С. 1531–1550.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Amangel'dy I.S. Uluchshenie operacionnoj jeffektivnosti v industrii 4.0: podhod prediktivnogo obsluzhivaniya [Improving operational efficiency in Industry 4.0: a predictive maintenance approach] / I.S. Amangel'dy, A.S. Bisembaev // Vestnik Kazhastansko-Britanskogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of the Kazakhstan-British Technical University]. — 2024. — Vol. 21. — № 2. — P. 10–18. [in Russian]
2. Ermakov V.A. Cifrovye servisy prediktivnoj analitiki pri obsluzhivanii proizvodstvennogo oborudovanija [Digital predictive analytics services in the maintenance of production equipment] / V.A. Ermakov, D.Zh. Korzun // Cifrovye tehnologii v obrazovanii, nauke, obshhestve [Digital technologies in education, science, society]. — 2019. — P. 73–75. [in Russian]
3. Lar'kin V.V. K voprosu primenenija prediktivnyh modelej obsluzhivaniya slozhnyh tehničeskikh sistem v processe ih jekspluatácii [On the application of predictive models for servicing complex technical systems during their operation] / V.V. Lar'kin [et al.] // Modeli i metody razvitiya tehnologij mashinostroenija v uslovijah cifrovizacii jekonomiki Rossii [Models and methods for the development of mechanical engineering technologies in the context of the digitalisation of the Russian economy]. — 2022. — P. 207–212. [in Russian]
4. Panfilova E.E. Analiz gotovnosti promyshlennyh predpriyatij k cifrovoj transformacii biznesa [Analysis of industrial enterprises' readiness for digital business transformation] / E.E. Panfilova // Moskovskij jekonomičeskij zhurnal [Moscow Economic Journal]. — 2019. — № 10. — P. 700–709. [in Russian]
5. Panfilova E.E. Prediktivnoe obsluzhivanie tehnologičeskogo oborudovanija kak strategija povyšeniya dohodnosti innovacionno-aktivnyh organizacij [Predictive maintenance of technological equipment as a strategy for increasing the

profitability of innovation-active organisations] / E.E. Panfilova, K.S. Sokolov // Aktual'nye napravlenija povyshenija dohodnosti biznesa: problemy, metody, reshenija-2019 [Current trends in increasing business profitability: problems, methods, solutions-2019]. — 2019. — P. 64–68. [in Russian]

6. Poljakov A.A. Prediktivnyj analiz sostojanija tehnologicheskogo oborudovanija [Predictive analysis of the condition of technological equipment] / A.A. Poljakov [et al.] // Nauka i biznes: puti razvitija [Science and business: paths of development]. — 2021. [in Russian]

7. Sajedzh E.M. Transformacija sistem tehničeskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovanija v uslovijah cifrovizacii [Transformation of equipment maintenance and repair systems in the context of digitalisation] / E.M. Sajedzh // Sovremennye paradigmy social'no-jekonomičeskogo razvitija Rossii v ramkah realizacii nacional'nyh proektov [Contemporary paradigms of Russia's socio-economic development within the framework of national projects]. — 2020. — P. 121–123. [in Russian]

8. Jakovleva M.V. Prediktivnoe obsluzhivanie oborudovanija na protjazhenii ego zhiznennogo cikla kak faktor sokrashhenija rashodov vysokotehnologičnyh predpriyatij [Predictive maintenance of equipment throughout its life cycle as a factor in reducing costs for high-tech enterprises] / M.V. Jakovleva, A.V. Shalina // Sistemy upravlenija polnym zhiznennym ciklom vysokotehnologičnoj produkcii v mashinostroenii: novye istochniki rosta [ull life cycle management systems for high-tech products in mechanical engineering: new sources of growth]. — 2023. — P. 186–190. [in Russian]

9. Jakovleva M.V. Algoritm prinjatija reshenij o vnedrenii prediktivnogo obsluzhivaniya oborudovanija na vysokotehnologičnyh predpriyatijah [Algorithm for making decisions on the implementation of predictive maintenance of equipment at high-tech enterprises] / M.V. Jakovleva, A.I. Shalina // Voprosy innovacionnoj jekonomiki [Issues of Innovative Economy]. — 2023. — Vol. 13. — № 1. — P. 159–172. [in Russian]

10. Jakovleva M.V. Razrabotka rekomendacij po vnedreniju prediktivnogo obsluzhivaniya oborudovanija na vysokotehnologičnyh predpriyatijah [Development of recommendations for the implementation of predictive maintenance of equipment at high-tech enterprises] / M.V. Jakovleva, A.I. Shalina // Voprosy innovacionnoj jekonomiki [Issues of Innovative Economy]. — 2023. — Vol. 13. — № 3. — P. 1531–1550. [in Russian]