



УДК 004.023:681.5

**О.В. Явурик**  
ФГАОУ ВО «Белгородский государственный  
национальный исследовательский университет»  
г. Белгород, Россия  
E-mail: yavurik@bsu.edu.ru  
Дата поступления 11.01.2023

## ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ НАДЕЖНОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

### Аннотация

В статье представлен выбор оптимального метода прогнозирования остаточного ресурса робототехнического комплекса на основе последовательной обработки экспертных суждений с применением метода анализа иерархий. Отобраны критерии выбора оптимального метода и описана их взаимодействие с параметрами эксплуатации робототехнического комплекса. Выбраны альтернативные методы прогнозирования остаточного ресурса.

**Ключевые слова:** робототехнические комплексы, надежность, прогнозирование остаточного ресурса, метод анализа иерархий.

### Введение

Для обеспечения работы различной промышленности технологическое оборудование является основным звеном производства. В настоящее время в структуру технологического оборудования все чаще входят промышленные роботы, составляя при этом робототехнический комплекс.

Согласно ГОСТ Р 60.0.0.4-2019, «робототехнический комплекс (РК) – это комплекс, состоящий из одного или нескольких роботов, их рабочих органов и любых механизмов, оборудования, приборов или датчиков, обеспечивающих выполнение роботом функционального назначения (задания)» [1].

Надежность робототехнического комплекса напрямую зависит от надежности его отдельных конструктивных элементов и отсутствия неисправностей в них. Прогнозирование надежности робототехнического комплекса позволит сократить количество отказов, правильно планируя время текущих и капитальных ремонтов, что увеличит долговечность оборудования.

В соответствии с ГОСТ 27.003–2016 [2], выбор и обоснование номенклатуры задаваемых показателей надежности зависит от характеристик рассматриваемого объекта. Робототехнический комплекс явля-

ется «объектом общего назначения; по режиму функционирования его можно отнести к объектам непрерывного длительного применения, по возможности восстановления и обслуживания – восстанавливаемый и обслуживаемый» [2].

Исходя из этого, в соответствии с таблицей Б.1 ГОСТ 27.003–2016, «эксплуатационная надежность робототехнических комплексов характеризуется показателями долговечности» [2].

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта, согласно ГОСТ 27.002–2015 [3].

Показатели долговечности и их номенклатура выбирается согласно признаком ГОСТ 27.003-2016: «по возможным последствиям перехода в предельное состояние, процессу, определяющему переход в предельное состояние и возможности и способу восстановления технического ресурса (срока службы)» [2]. Согласно таблице Б.2 [2], показателем долговечности для робототехнического комплекса является показатель – гамма-процентный и/или средний остаточный ресурс.

Остаточный ресурс – это суммарная наработка объекта от момента контроля его

технического состояния до момента достижения предельного состояния: средний ресурс – математическое ожидание ресурса, гамма-процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью, выраженной в процентах [3].

### Основная часть

Расчет показателей долговечности, в частности остаточного ресурса, производится, согласно методическим указаниям [4]. В зависимости от срока эксплуатации существуют два способа прогнозирования остаточного ресурса:

- упрощенный – детерминистическая оценка показателей;

- уточненный – вероятностная оценка.

Первый способ подразумевает использование информации о нагруженности, при другом – исследуется степень поврежденности оборудования [4]. Основные характеристики способов прогнозирования остаточного ресурса представлены в таблице 1.

Классификация методов прогнозирования остаточного ресурса представлена на рисунке 1. Каждый метод подразумевает проведение исследования и на его основании выполнение расчетов, в соответствии с алгоритмом действий, изложенным в нормативных документах.

Таблица 1

Основные характеристики способов прогнозирования остаточного ресурса

Детерминистические методы	Вероятностные методы
малый срок эксплуатации (относительно нормативного)	срок эксплуатации, близкий к нормативному
незначительная поврежденность оборудования	значительная поврежденность элементов оборудования
меньшая трудоемкость	точный прогноз
	возможность выявления дополнительного резерва ресурса оборудования



Рисунок 1. Классификация методов прогнозирования остаточного ресурса

## Нормативные документы методов прогнозирования остаточного ресурса

№ п/п	Метод прогнозирования остаточного ресурса	Нормативный документ
1	Прогнозирование остаточного ресурса при малоцикловых нагрузках	ГОСТ 25859-83 «Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках»
2	Метод прогнозирования остаточного ресурса составных частей	РД 50-490-84 «Методические указания. Техническая диагностика. Методика прогнозирования остаточного ресурса машин и деталей по косвенным параметрам»
3	Оценка остаточного ресурса по изменениям контролируемого параметра	ГОСТ 23942-80 «Оценка показателей качества продукции по изменениям контролируемого параметра»
4	Оценка предельных размеров повреждений статистическими методами	РД 50-690-89 «Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным»
5	Прогнозирование остаточного ресурса по развитию коррозионных повреждений	РД 26.260.004-91 «Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации»
6	Оценка остаточного ресурса по изменению выходных параметров	ГОСТ 27.302-86 «Надежность в технике. Методы определения допустимого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин»

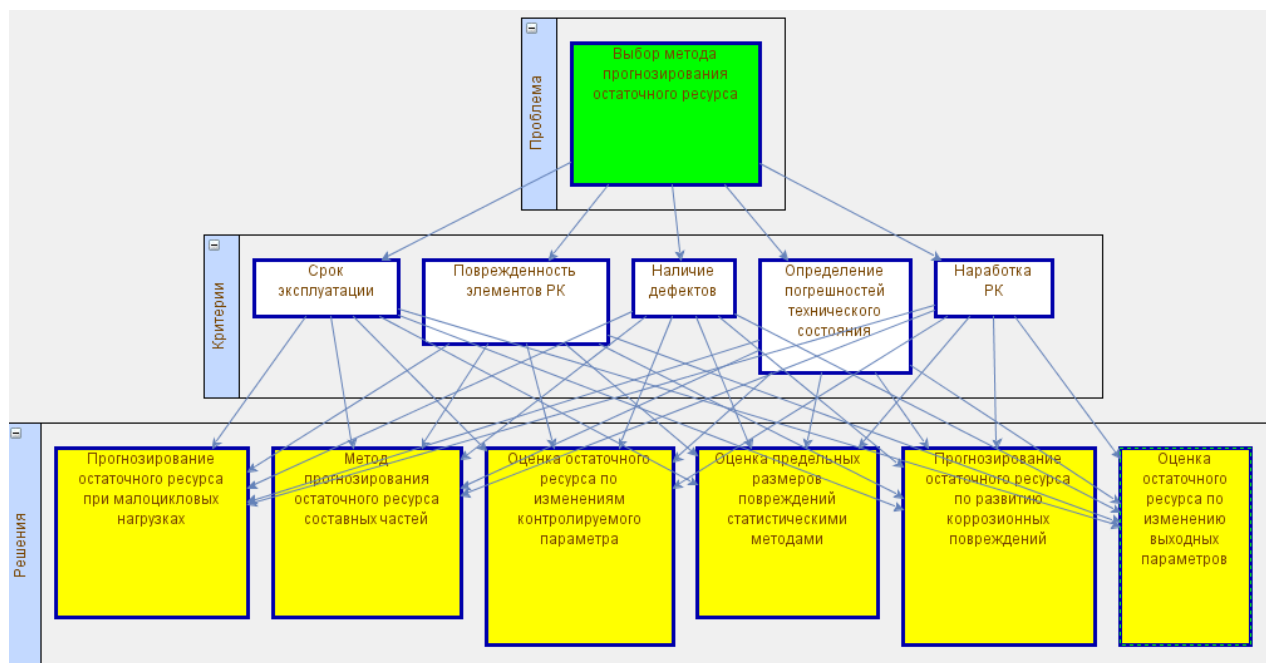


Рисунок 2. Иерархия выбора метода прогнозирования остаточного ресурса

Выбор метода прогнозирования остаточного ресурса должен учитывать факторы, влияющие на конечный результат: условия эксплуатации, причины потери работоспособности, фактические действующие нагрузки, размеры дефектов и повреждений и т.д. Связь между факторами является несистематичной, что требует определения взаимосвязи параметров.

С целью выполнения данной задачи можно применить один из методов многокритериальной оптимизации – метод анализа иерархий (МАИ) [5]. Первым шагом МАИ является анализ проблемы и построение иерархической структуры [6]. Целью является выбор оптимального метода прогнозирования остаточного ресурса. Критериями были выбраны основные параметры, влияющие на надежность робототехнических комплексов:

- срок эксплуатации;
- поврежденность элементов робототехнических комплексов;
- наличие дефектов;
- определение погрешностей технического состояния;
- наработка РК;

В качестве альтернатив выбраны методы прогнозирования остаточного ресурса, согласно классификации, представленной на рисунке 1:

- прогнозирование остаточного ресурса при малоцикловых нагрузках;
- метод прогнозирования остаточного ресурса составных частей;
- оценка остаточного ресурса по изменениям контролируемого параметра;
- оценка предельных размеров повреждений статистическими методами;
- прогнозирование остаточного ресурса по развитию коррозионных повреждений;
- оценка остаточного ресурса по изменению выходных параметров.

Иерархия выбора метода прогнозирования остаточного ресурса представлена на рисунке 2.

Следующим этапом при выборе метода прогнозирования остаточного ресурса является попарное сравнение альтернатив относительно каждого критерия. Для критерия «Срок эксплуатации» матрица парных сравнений представлена на рисунке 3.

Отношение согласованности составляет менее 8% (7,1%), отсюда следует, что матрица построена корректно. Аналогичным образом строятся матрицы парных сравнений для оставшихся критериев (рисунки 4-7).

Сравнение решений по критерию "Срок эксплуатации"

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Приоритеты
1. Прогнозирование остаточного ресурса при малоцикловых нагрузках	1	1/2	1/3	1/2	1/7	1/4	0,051
2. Метод прогнозирования остаточного ресурса составных частей	2	1	3	4	1/3	3	0,227
3. Оценка остаточного ресурса по изменению контролируемого параметра	3	1/3	1	2	1/3	1	0,125
4. Оценка предельных размеров повреждений статистическими методами	4	1/4	1/2	1	1/3	1/3	0,073
5. Прогнозирование остаточного ресурса по развитию коррозионных повреждений	5	7	3	3	1	3	0,384
6. Оценка остаточного ресурса по изменению выходных параметров	6	4	1/3	1	3	1	0,140

СЗ: 6,439 ИС: 0,088 ОС: 0,071 F: 0,080

Рисунок 3. Матрица парных сравнений для критерия «Срок эксплуатации»

Сравнение решений по критерию "Поврежденность элементов РК"

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Приоритеты
1. Прогнозирование остаточного ресурса при малоцикловых нагрузках	1	1/5	1/3	1/3	1/2	1/3	0,050
2. Метод прогнозирования остаточного ресурса составных частей	2	1	5	5	2	5	0,420
3. Оценка остаточного ресурса по изменению контролируемого параметра	3	1/5	1	1/2	1/3	1/2	0,078
4. Оценка предельных размеров повреждений статистическими методами	4	1/5	2	1	1/5	2	0,113
5. Прогнозирование остаточного ресурса по развитию коррозионных повреждений	5	2	1/2	3	5	1	0,241
6. Оценка остаточного ресурса по изменению выходных параметров	6	3	1/5	2	1/2	1/3	0,098

СЗ: 6,463 ИС: 0,093 ОС: 0,075 F: 0,128

Рисунок 4. Матрица парных сравнений для критерия «Поврежденность элементов РК»

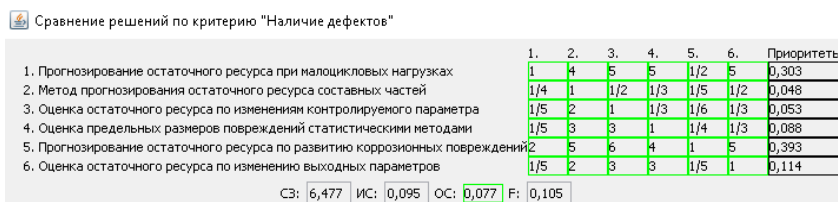


Рисунок 5. Матрица парных сравнений для критерия «Наличие дефектов»

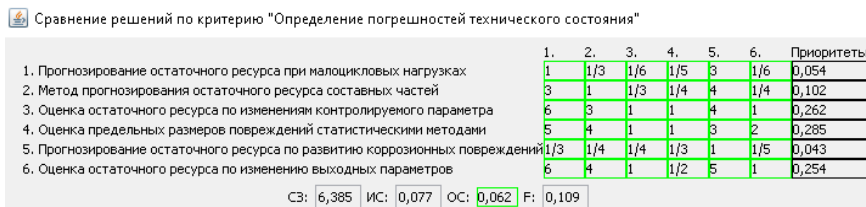


Рисунок 6. Матрица парных сравнений для критерия «Определение погрешностей технического состояния»

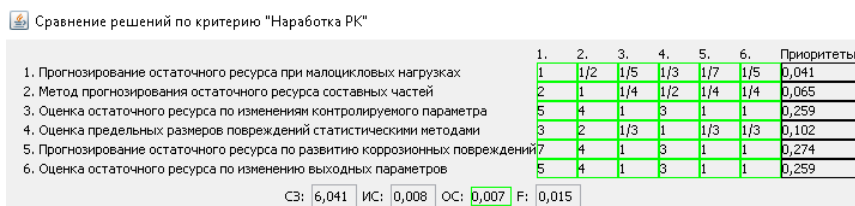


Рисунок 7. Матрица парных сравнений для критерия «Наработка РК»

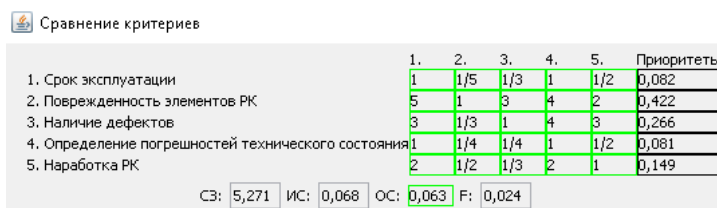


Рисунок 8. Матрица парных сравнений критериев

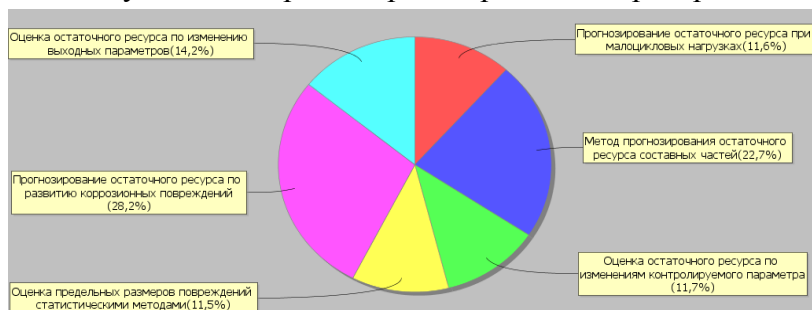


Рисунок 9. Результат расчетов приоритетов

Анализируя значения отношения согласованности матриц парных сравнений альтернатив по всем критериям, можно судить о корректности их составления.

Заключительным этапом МАИ является попарное сравнение всех критериев относительно выбранной цели (рисунок 8).

При построении матрицы парных сравнений критериев, возможно менять предпочтение в пользу того или иного критерия в зависимости от преследуемых целей. В данном случае, предпочтение было отдано в пользу критерия «Поврежден-

ность элементов РК» и небольшое предпочтение относительно критерия «Наличие дефекта».

Экспертная оценка при сравнении критериев может меняться в зависимости от технологической ситуации, изменения приоритетов надежности робототехнического комплекса, а также многих других факторов.

### Заключение

Результатом парных сравнений альтернатив является выбор оптимального метода прогнозирования остаточного ресурса

(рисунок 9). В данном случае, предпочтительным методом будет прогнозирование остаточного ресурса по развитию коррозионных повреждений (28,2%), также преобладает среди остальных – метод прогнозирования остаточного ресурса составных частей (22,7%).

#### Библиографический список

1. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 февраля 2019 г. № 31-ст: введен взамен ГОСТ Р ИСО 8373-2014 / подготовлен ФГАНУ «ЦНИИ РТК». Москва: Стандартинформ, 2019. 31 с.
2. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: принят межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 22 ноября 2016 г. № 93-П): введен взамен ГОСТ 27.003-90 / разработан АО «НПФ «ЦКБА». Москва: Стандартинформ, 2016. 23 с.
3. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: принят межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 28 декабря 2015 г. № 83-П): введен взамен ГОСТ 27.002-89 / разработан ООО «ИНМиТ». Москва: Стандартинформ, 2015. 30 с.
4. РД 26.260.004-91. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации: методические указания: введен 01.01.1992 г. / разработан в НИИ ХимМаш, утвержден в концерне «Химнефтемаш» 01.01.1991 г. Москва: Стандартинформ, 1992. 96 с.
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
6. Кравченко Т.К., Исаев Д.В. Системы поддержки принятия решений. – М.: Издательство Юрайт, 2022. 292 с.
7. Ломакин В.В., Лифиренко М.В. Алгоритм повышения степени согласованности матрицы парных сравнений при проведении экспертных опросов // Фундаментальные исследования. 2013. № 11. С. 1798 - 1803.
8. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / URSS. 2016. 532 с.

---

#### *Information about the paper in English*

**O.V. Yavurik**

Belgorod State National Research University  
Belgorod, Russia  
E-mail: yavurik@bsu.edu.ru  
Receipt date: January 11, 2023

#### SYSTEM APPROACH APPLIED FOR ROBOT SYSTEM RELIABILITY PREDICTION

##### **Abstract**

This paper describes how to choose an optimum technique to predict the remaining life of a robot system by consistently processing expert opinions using the analytic hierarchy process. The author chooses selection criteria and describes their interaction with the robot system operating parameters. Alternative prediction techniques are also highlighted.

**Keywords:** robot systems, reliability, prediction of remaining life, analytic hierarchy process

---