

## РЕФЕРАТ-ПРЕЗЕНТАЦИЯ

научной работы, выдвинутой акционерным обществом «75 арсенал»  
на конкурс по присуждению премии им. С.И. Мосина

«Разработка программно-аппаратного комплекса проактивного  
прогнозирования критического снижения функциональных характеристик  
РЛС на основе цифровых двойников»

Авторский коллектив:

1. Осипов Александр Владимирович, руководитель работы,  
инженер - конструктор, АО «75 арсенал»
2. Тимошенко Александр Васильевич,  
д.т.н., профессор, инженер - конструктор, АО «75 арсенал»
3. Кочкаров Азрет Ахматович,  
к.ф.-м.н., инженер - конструктор, АО «75 арсенал»
4. Перлов Анатолий Юрьевич,  
к.т.н., инженер - конструктор, АО «75 арсенал»
5. Сычугов Алексей Алексеевич  
к.т.н., доцент, директор института прикладной математики и компьютерных  
наук, ТулГУ

## 1. Краткое содержание работы

Современные радиолокационные станции (РЛС) – это структурно-сложные радиотехнические и информационные системы, характеризующиеся большим числом цифровых компонентов в своем составе. Обеспечение бесперебойной и безотказной работы РЛС в течение всего срока эксплуатации – необходимое условие для выполнения их задач по назначению. В значительной степени работоспособность РЛС определяется качеством и надежностью функциональных систем, блоков и других цифровых компонентов, входящих в ее состав.

В настоящее время методы ведения боевых действий и активное развитие средств воздушно-космического нападения показывают острую необходимость повышения эффективности РЛС обнаружения и целеуказания на основе поддержания заданных функциональных характеристик в процессе применения по назначению. Одним из приоритетных направлений решения данной задачи является прогнозирование критического снижения боевых возможностей, которые можно оценить путем анализа влияния технического состояния структурных элементов локатора на значения ключевых функциональных характеристик РЛС, например, энергетический потенциал.

Вместе с тем, происходящие отказы и сбои в функционировании РЛС – явления хоть и имеющие редкий характер, но, порой, приводящие к критическому снижению функциональных характеристик, не позволяющему изделию выполнять задачи по назначению. Цифровизация современных РЛС, уровень развития систем диагностического контроля ее компонентов, а также достижения в области методов искусственного интеллекта, позволяют перейти к решению задачи прогнозирования функциональных характеристик РЛС.

Актуальность применения методов искусственного интеллекта в РЛС различного назначения обусловлена:

- указом Президента Российской Федерации по развитию ВКО, в числе задач которого определена разработка программно-технического комплекса

автоматизации системы информационно-логистической поддержки технической эксплуатации и сервисного обслуживания;

- национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, в числе задач которой определено прогнозирование отказов оборудования, его превентивное техническое обслуживание и оптимизация планирования поставок запасных частей способствует созданию условий для улучшения эффективности эксплуатации;

- необходимостью решения задачи прогнозирования функциональных характеристик РЛС в целях непрерывного поддержания заданных ТТХ.

Таким образом, существующие требования по применению методов искусственного интеллекта в современных РЛС обуславливают актуальность создания программно-аппаратного комплекса (ПАК), ключевыми показателями которого являются точность, горизонт и время вычислений прогноза.

Разработанный ПАК на базе РЛС, обслуживаемых в АО «75 арсенал» должен стать основой для разработки перспективных систем прогнозирования и их интеграции в состав существующих автоматизированных систем управления эксплуатацией РЛС, а также создать предпосылки для перехода к превентивному техническому обслуживанию широкого класса изделий ВВСТ (например, ЗРК), что определяет актуальность самого исследования.

## **2. Основная техническая идея работы**

Редкий характер отказов высоконадежных РЛС приводит к малому объему выборки данных об отказах, необходимой для высокоточного прогнозирования функциональных характеристик. Требование к накоплению массива статистических данных может быть ослаблено за счет разработки цифровых двойников известных компонентов РЛС, т.к. часть данных может быть синтезирована имитацией технического состояния основных элементов изделий.

Таким образом, заявленное исследование направлено на разработку программно-аппаратного комплекса (ПАК) проактивного прогнозирования функциональных характеристик РЛС с использованием цифровых двойников функциональных систем в условиях ограниченного количества данных о диагностической информации и об отказах РЛС.

Разработанный ПАК является уникальным изделием, и включает:

- модуль обработки и фильтрации данных о техническом состоянии элементов РЛС;
- цифровой двойник РЛС;
- модуль определения критически важных элементов РЛС на основе формирования булевой структурной схемы надежности.
- модуль прогнозирования функциональных характеристик РЛС на основе реальных и синтетических данных о состоянии критически важных элементов РЛС.

Блок схема работы ПАК показана на рисунке 1.

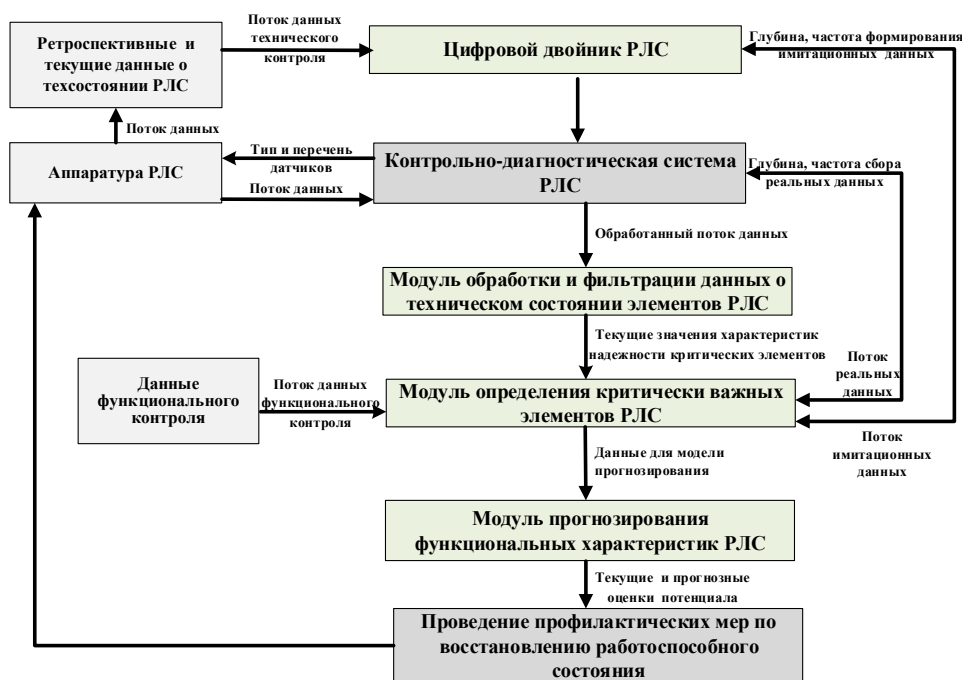


Рисунок 1 – Блок схема работы ПАК

Новизна разработанного ПАК заключается в следующем:

- модуль обработки и фильтрации данных о техническом состоянии элементов РЛС, обеспечивает формирование репрезентативной обучающей

выборки для модели прогнозирования с учетом проверки качества обучения с помощью различных метрик;

- цифровой двойник РЛС учитывает структурно-функциональную схему всех структурных элементов, что позволяет повысить информационную полноту обучающей выборки для модели прогнозирования начиная с этапа разработки РЛС.

- модуль определения критически важных элементов РЛС на основе булевой модели надежности, который, в отличие от известных, учитывает уникальные наборы состояний элементов РЛС и гипотезы монотонности булевых функций, что позволяет находить структурные элементы станции, сочетания отказов которых приводит к недопустимому снижению потенциала, и формировать критерии отказа системы, определяющие информативное пространство элемент-признак для контроля энергетического потенциала в режиме реального времени;

- модуль прогнозирования функциональных характеристик РЛС на основе учета корреляционных связей параметров технического состояния и алгоритма градиентного бустинга, который, в отличие от известных, позволяет формировать репрезентативную выборку, состоящую из потока данных о наиболее информативных параметрах критически важных элементов и обеспечивает необходимую точность и время вычисления прогноза;

Таким образом, разработанный ПАК позволяет сформировать информативное пространство элемент-признак по данным диагностического контроля РЛС, что имеет важное значение для обеспечения непрерывного прогнозирования функциональных характеристик с заданным горизонтом и точностью прогноза в режиме реального времени.

Структурная схема ПАК показана на рисунке 2.

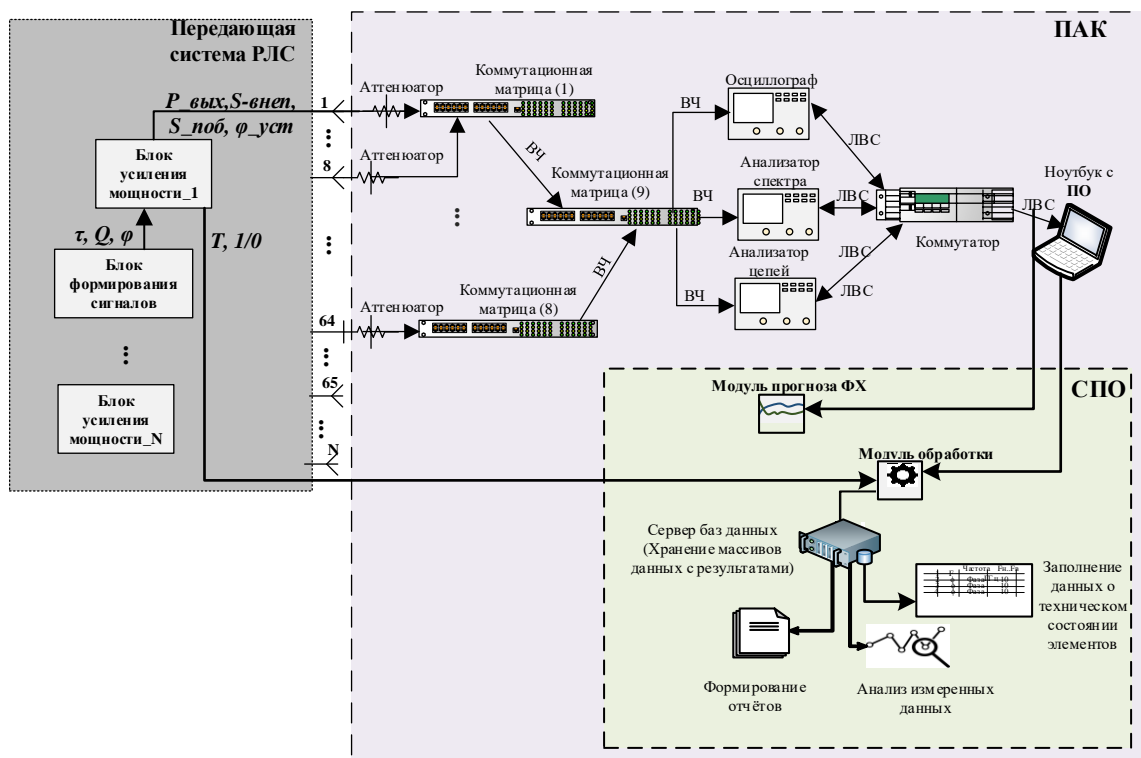


Рисунок 2 – Структурная схема ПАК

На схеме показано подключение ПАК к передающей системе РЛС, а именно к подрешетке, содержащей блоки усиления мощности в своем составе. Программные модули по обработке, анализу и прогнозу вместе с цифровым двойником входят в состав специального программного обеспечения ПАК.

Конструктивно ПАК состоит из стойки с установленным оборудованием: ПК с СПО (в состав которого входят все программные модули из состава ПАК), измерительные приборы и технологическая оснастка. ПАК позволяет прогнозировать функциональные характеристики РЛС с учетом данных технического состояния и измерений выходных характеристик РЛС, таких как: длительность фронта (среза) огибающей сигнала, выходная импульсная мощность, относительный уровень побочных составляющих спектра, относительный уровень внеполосных составляющих спектра, длительность огибающей сигнала, фаза коэффициента передачи, неравномерность АЧХ.

Конфигурация ПАК имеет возможность расширения на дополнительное число каналов за счет модульной структуры коммутационных матриц. Благодаря использованию в составе ПАК аттенюаторов обеспечивается

возможность излучения мощности всеми передающими каналами РЛС, что позволило проводить измерения на высоком уровне мощности при максимальном тепловыделении технологической аппаратуры передающего комплекса.

Основные технические характеристики разработанного ПАК приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики ПАК

Наименование	Значение
1. Точность прогноза	не менее 80 %
2. Горизонт прогноза	не менее 20 мин.
3. Количество коммутируемых каналов	64
4. Частотный диапазон коммутируемых сигналов, МГц	10 – 18000
5. Затухание входного сигнала коммутируемого канала в диапазоне частот от 100 до 8000 МГц, не более, дБ	70
6. Импульсная входная мощность, не более, Вт	500
7. Скважность входных сигналов, не менее	3
8. Развязка коммутируемых каналов, дБ	80
9. Время измерений подрешетки, не более, мин.	60
10. Габаритные размеры, Ш x В x Г, м	1,2 x 2,05 x 0,6
11. Масса, кг	400

Таким образом, решение задачи по автоматизации измерений выходных трактов РЛС в совокупности с модулями обработки данных из состава СПО позволило сформировать репрезентативную обучающую выборку для прогнозирования потенциала и определить требования к показателям эффективности прогноза (горизонт и точность) уже на этапе изготовления изделия.

### 3. Значения результатов для практики, достигнутый эффект

Разработанный ПАК позволил в реальном масштабе времени выявить снижение энергетического потенциала с требуемыми точностью и интервалом прогнозирования на основе информации о режимах работы РЛС и регистрируемых параметров технического состояния.

ПАК экспериментально проверен авторами при прогнозе отказов, связанных с критическим снижением энергетического потенциала РЛС обнаружения и целеуказания, предназначенной для работы в составе зенитно-ракетного комплекса для обнаружения и опознавания воздушных целей. Под отказом РЛС понимается критическое снижение ее энергетического потенциала. Эксперимент проводился для наиболее теплонапряженного режима, соответствующего максимальной длительности и минимальной скважности зондирующих сигналов.

Результаты экспериментальной проверки ПАК показали, что ошибка прогнозирования отказа РЛС на период 20 мин. составляет не более 13% (рисунок 3).

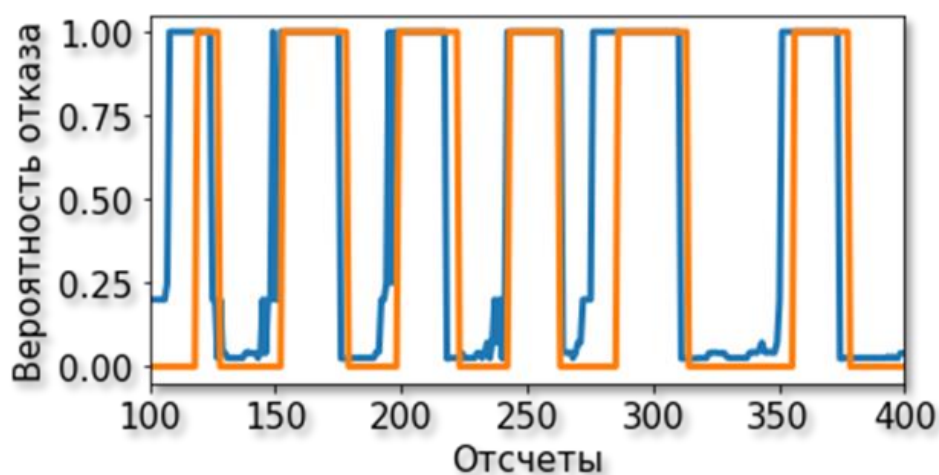


Рисунок 3 – Прогнозирование отказа РЛС (оранжевым цветом показана кривая по реальным данным, синим цветом кривая по данным прогноза).

Под одним отсчетом понимается интервал времени сбора данных, равный 20 сек., а под отказом критическое снижение потенциала РЛС. Полученный горизонт прогнозирования (20 мин.) достаточен, чтобы



обслуживающий персонал смог предпринять необходимые меры и предотвратить снижение ТТХ. Точность прогнозирования была достигнута за счет учета параметров зондирующих сигналов передающей системы, а также температуры блоков усиления мощности.

Разработанный ПАК прогнозирования функциональных характеристик РЛС имеет следующие ключевые преимущества по сравнению с известными:

- обеспечивает высокую точность прогнозирования с использованием современных методов машинного обучения;

- является унифицированным и может применяться для создания широкого класса радиоинформационных средств с цифровыми компонентами и системой диагностического контроля в своем составе;

- может быть применен как полностью, так и на отдельных этапах создания систем прогнозирования (определение технических требований, верификация созданной системы и т.д.).

Новизна предлагаемого авторами ПАК заключается в определении критически важных элементов РЛС и параметров технического состояния на основе анализа многомерных временных рядов о состоянии элементов контроля РЛС, что позволяет определить информативное пространство элемент-признак для прогнозирования функциональных характеристик станции.

В дальнейшем планируется использование разработанного ПАК при создании программно-технических комплексов автоматизации систем информационно-логической поддержки технической эксплуатации и сервисного обслуживания как для созданных РЛС, так и для вновь разрабатываемых.

Таким образом, разработанный ПАК и полученный благодаря ему задел для создания автоматизированной системы управления эксплуатацией РЛС, является одним из ключевых звеньев для формирования конкурентоспособного предложения к получению в ближайшем будущем новых Гособоронзаказов.