Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.37(004.05)

Лавринчик Николай Николаевич

Методика прогнозирования показателей радиотехнических средств методом экстраполяции

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание степени магистра технических наук
по специальности 7-06-0713-03
«Радиосистемы и радиотехнологии»

Лавринчик Н.Н.
_____

Научный руководитель
Гринкевич Антон Витальевич
кандидат технических наук, доцент
_____

Минск 2026

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития радиотехнических систем существенно возрастает роль методов прогнозирования их основных показателей, таких как надёжность, помехоустойчивость, энергетическая эффективность и качество функционирования. Усложнение архитектуры радиотехнических средств, увеличение плотности их размещения и рост требований к стабильности и непрерывности работы обусловливают необходимость заблаговременной оценки изменения их параметров в процессе эксплуатации.

Прогнозирование показателей радиотехнических средств является важным инструментом повышения эффективности их проектирования, эксплуатации и модернизации. Оно позволяет своевременно выявлять негативные тенденции, снижать вероятность отказов оборудования, оптимизировать использование ресурсов и повышать качество предоставляемых услуг. Актуальность задач прогнозирования усиливается в условиях неопределённости внешней среды, наличия случайных помех, нестабильности характеристик элементной базы и изменяющихся условий распространения радиоволн.

В настоящее время разработан широкий спектр методов прогнозирования, отличающихся используемым математическим аппаратом, требованиями к исходным данным и областью практического применения. Среди них особое место занимают статистические методы, основанные на анализе временных рядов эксплуатационных данных. Одним из наиболее распространённых и простых в реализации подходов является метод экстраполяции, позволяющий строить прогнозы на основе выявленных тенденций изменения показателей во времени.

В магистерской диссертации рассматриваются теоретические основы и практические аспекты прогнозирования показателей радиотехнических средств, проводится анализ некоторых существующих методик прогнозирования, а также обосновывается целесообразность применения экстраполяционных методов для решения задач оценки и прогнозирования их временной динамики. Особое внимание уделяется проблемам повышения точности прогнозов и учёта специфики функционирования радиотехнических средств в реальных условиях эксплуатации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью работы - является разработка и обоснование методики прогнозирования показателей радиотехнических средств на основе метода экстраполяции, обеспечивающей повышение точности и надёжности прогнозных оценок в условиях реальной эксплуатации.

Задачи исследования:

- Провести анализ существующих методов и методик прогнозирования показателей радиотехнических средств и определить их основные достоинства и ограничения.

- Исследовать особенности показателей радиотехнических средств как объектов прогнозирования и их временную динамику.

- Проанализировать применимость экстраполяционных методов для прогнозирования показателей радиотехнических средств в условиях неопределённости и изменяющейся радиотехнической обстановки.

- Разработать методику прогнозирования показателей радиотехнических средств на основе экстраполяции временных рядов.

-Обосновать выбор экстраполяционных моделей и параметров прогнозирования с учётом специфики радиотехнических средств.

-Оценить эффективность и точность предложенной методики прогнозирования на основе количественных критериев качества.

-Проанализировать устойчивость разработанной методики к искажениям исходных данных и изменению условий эксплуатации радиотехнических средств.

Объект - в магистерской диссертации являются радиотехнические средства гражданского назначения и процессы изменения их показателей в процессе эксплуатации.

Предмет - исследования являются методы и модели прогнозирования показателей радиотехнических средств, а также алгоритмы экстраполяции временных рядов, применяемые для оценки их будущих значений.

Актуальность темы

Современный этап развития гражданских радиотехнических средств характеризуется усложнением их структуры, расширением функциональных возможностей и ростом требований к качеству, надёжности и устойчивости функционирования. Радиотехнические системы связи, навигации, радиовещания и передачи данных эксплуатируются в условиях высокой динамики внешней среды, интенсивного роста объёмов передаваемой информации и увеличения

плотности пользователей. В таких условиях возрастает необходимость заблаговременной оценки изменения основных показателей радиотехнических средств, что обуславливает актуальность задач их прогнозирования.

Прогнозирование показателей радиотехнических средств играет ключевую роль при решении задач проектирования, эксплуатации, модернизации и управления радиотехническими системами. Точность прогнозных оценок непосредственно влияет на эффективность использования радиочастотного спектра, устойчивость работы систем, уровень качества обслуживания пользователей и экономическую целесообразность принимаемых инженерных решений. Ошибки прогнозирования могут приводить к снижению пропускной способности, росту вероятности отказов, ухудшению помехоустойчивости и необходимости внеплановых затрат на реконфигурацию или модернизацию оборудования.

Особенностью радиотехнических средств как объектов прогнозирования является их функционирование в условиях неопределённости и случайных воздействий. На показатели радиотехнических средств оказывают влияние как внутренние факторы, связанные с техническим состоянием аппаратуры, старением элементной базы и режимами работы, так и внешние факторы, включающие изменение условий распространения радиоволн, электромагнитную обстановку, климатические воздействия и динамику пользовательской нагрузки. В результате временные ряды показателей радиотехнических средств обладают сложной структурой, включающей трендовые, периодические и случайные компоненты, что существенно усложняет задачу прогнозирования.

Анализ существующих методик прогнозирования, выполненный в работе, показывает, что в настоящее время применяется широкий спектр аналитических, имитационных, статистических, стохастических и интеллектуальных методов. Однако ни один из указанных подходов не является универсальным и не обеспечивает требуемую точность прогнозирования во всём диапазоне условий эксплуатации радиотехнических средств. Аналитические методы требуют существенных упрощающих предположений, имитационные и интеллектуальные методы характеризуются высокой вычислительной сложностью и зависимостью от качества исходных данных, а стохастические подходы ограничены областью применимости и наличием репрезентативной статистической информации.

В этой связи особый интерес представляют экстраполяционные методы прогнозирования, основанные на анализе временных рядов эксплуатационных данных. Метод экстраполяции отличается относительной простотой реализации,

вычислительной эффективностью и возможностью применения в условиях ограниченности априорной информации о физической природе процессов, протекающих в радиотехнических средствах. Наличие больших массивов данных, накапливаемых в процессе эксплуатации современных радиотехнических систем, делает экстраполяционный подход особенно актуальным для задач мониторинга, планирования и оперативного управления.

Вместе с тем применение метода экстраполяции в радиотехнике связано с рядом проблем, включая нестационарность временных рядов, наличие шумов и выбросов, а также ограниченность горизонта достоверного прогнозирования. Это обуславливает необходимость разработки и обоснования методики прогнозирования показателей радиотехнических средств на основе экстраполяции, учитывающей специфику радиотехнических объектов и особенности изменения их показателей во времени.

Актуальность темы магистерской диссертации определяется необходимостью повышения точности и надёжности прогнозирования показателей радиотехнических средств в условиях реальной эксплуатации, а также практической значимостью разработки методики прогнозирования на основе экстраполяционных методов, ориентированной на использование эксплуатационных данных и применение в радиотехнических системах.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработана методика прогнозирования показателей радиотехнических средств, основанная на использовании методов линейной и нелинейной экстраполяции, учитывающая характер изменения параметров во времени.

2. Сформирован алгоритм прогнозирования, включающий этапы предварительной обработки исходных данных, выбора модели экстраполяции, оценки её параметров и анализа точности полученного прогноза.

3. Предложены критерии оценки точности прогнозирования, позволяющие сравнивать результаты экстраполяции с фактическими значениями показателей радиотехнических средств.

Апробация результатов диссертации

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на конференции:

На 60-я Юбилейная научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, Минск, 2024

На открытой республиканской научно-практической интернет-конференции 21-22 ноября 2024 г., Минск, Республика Беларусь

На 61-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, Минск, 2025

Опубликованность результатов диссертации

Материалы, положенные в основу диссертационного исследования, докладывались и обсуждались на трёх научных конференциях, в том числе:

на 60-й юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, 2024 г.);

на открытой республиканской научно-практической интернет-конференции (21–22 ноября 2024 г., Минск, Республика Беларусь);

на 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, 2025 г.).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения и библиографического списка.

Общий объём диссертационной работы составляет 98 страниц, включая 87 страниц основного текста, 5 блок-схем, 4 таблицы, библиографический список.

ГЛАВА 1
АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Прогнозирование показателей радиотехнических систем (РТС) является важнейшей задачей, обеспечивающей повышение эффективности их функционирования, надежности и оптимизацию процессов технической эксплуатации. На сегодняшний день разработан ряд методик прогнозирования, которые условно можно разделить на три основные группы: аналитические, имитационные и методы интеллектуальной обработки данных.

Аналитические методы базируются на вероятностно-статистических моделях и физических уравнениях, описывающих процессы функционирования РТС. К их числу относятся методы надежностного анализа (модели Вейбулла, экспоненциальное и логнормальное распределения отказов), а также аналитические модели распространения радиоволн и оценки энергетических характеристик. Преимуществом данного подхода является математическая строгость и возможность теоретического обоснования результатов, однако недостатком выступает низкая адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации и необходимость априорной информации о параметрах.

Имитационные методы включают моделирование процессов функционирования РТС с помощью вычислительных экспериментов. Наиболее широко применяются методы Монте-Карло (описание математической модели с использованием генератора случайных величин), системно-динамическое моделирование, а также специализированные *CAD/CAE*-пакеты (*MATLAB/Simulink, CST, HFSS* и др.).

Эти методы позволяют учитывать сложные нелинейные процессы и внешние факторы, влияющие на работу систем. Их ограничением является высокая вычислительная трудоемкость и зависимость от качества исходных данных.

Методы интеллектуальной обработки данных и машинного обучения в последние годы находят все более широкое применение. К ним относятся регрессионные модели, нейронные сети, алгоритмы прогнозирования временных рядов (*ARIMA, LSTM* и др.). Данный подход позволяет строить прогнозы на основе накопленных эксплуатационных данных, выявлять скрытые зависимости и адаптироваться к изменению условий работы. Однако такие методы требуют больших объемов обучающей выборки и зачастую имеют характер «черного ящика», что затрудняет их интерпретацию.

В математике экстраполяция – это разновидность аппроксимации, при которой оценивание значения переменной производится не внутри интервала ее изменения (интерполяция), а вне его. При этом экстраполяция в большей степени, чем интерполяция подвержена влиянию неопределенности и риску получить некорректные результаты.

В анализе данных основное применение экстраполяции – прогнозирование. Экстраполяционные методы являются одними из самых распространенных и наиболее разработанных среди всей совокупности методов прогнозирования.

Фактически, экстраполяция – это попытка распространить наблюдаемые в прошлом зависимости в данных, на будущее. Поэтому с точки зрения бизнеса это и есть задача прогнозирования, а экстраполяция – один из механизмов ее решения.

Существует несколько методов экстраполяции, выбор наиболее подходящего из которых зависит от априорных сведений о процессе, который сформировал наблюдаемые точки данных – является ли функция гладкой, непрерывной или периодической. Методы экстраполяции, в основном, те же самые, что и интерполяции.

Методы прогнозной экстраполяции

При формировании прогнозов с помощью экстраполяции обычно исходят из статистически складывающихся тенденций изменения тех или иных количественных характеристик объекта. Экстраполируются оценочные функциональные системные и структурные характеристики. Экстраполяционные методы являются одними из самых распространенных и наиболее разработанных среди всей совокупности методов прогнозирования.

С помощью этих методов экстраполируются количественные параметры больших систем, количественные характеристики экономического, научного, производственного потенциала, данные о результативности научно-технического прогресса, характеристики соотношения отдельных подсистем, блоков, элементов в системе показателей сложных систем и др.

Однако степень реальности такого рода прогнозов и соответственно мера доверия к ним в значительной мере обусловливаются аргументированностью выбора пределов экстраполяции и стабильностью соответствия "измерителей" по отношению к сущности рассматриваемого явления. Следует обратить внимание на то, что сложные объекты, как правило, не могут быть охарактеризованы одним параметром. В связи с этим можно сделать некоторое представление о последовательности действий при статистическом анализе тенденций и экстраполировании, которое состоит в следующем:

-во-первых, должно быть четкое определение задачи, выдвижение гипотез о возможном развитии прогнозируемого объекта, обсуждение факторов, стимулирующих и препятствующих развитию данного объекта, определение необходимой экстраполяции и её допустимой дальности;

-во-вторых, выбор системы параметров, унификация различных единиц измерения, относящихся к каждому параметру в отдельности;

-в-третьих, сбор и систематизация данных. Перед сведением их в соответствующие таблицы еще раз проверяется однородность данных и их сопоставимость: одни данные относятся к серийным изделиям, а другие могут характеризовать лишь конструируемые объекты;

-в-четвертых, когда вышеперечисленные требования выполнены, задача состоит в том, чтобы в ходе статистического анализа и непосредственной экстраполяции данных выявить тенденции или симптомы изменения изучаемых величин. В экстраполяционных прогнозах особо важным является не столько предсказание конкретных значений изучаемого объекта или параметра в таком-то году, сколько своевременное фиксирование объективно намечающихся сдвигов, лежащих в зародыше назревающих тенденций.

Для повышения точности экстраполяции используются различные приемы. Один из них состоит, например, в том, чтобы экстраполируемую часть общей кривой развития (тренда) корректировать с учетом реального опыта развития отрасли-аналога исследований или объекта, опережающих в своем развитии прогнозируемый объект.

Под трендом понимается характеристика основной закономерности движения во времени, в некоторой мере свободной от случайных воздействий. Тренд — это длительная тенденция изменения экономических показателей. При разработке моделей прогнозирования тренд оказывается основной составляющей прогнозируемого временного ряда, на которую уже накладываются другие составляющие. Результат при этом связывается исключительно с ходом времени. Предполагается, что через время можно выразить влияние всех основных факторов.

Под тенденцией развития понимают некоторое его общее направление, долговременную эволюцию. Обычно тенденцию стремятся представить в виде более или менее гладкой траектории.

Анализ показывает, что ни один из существующих методов не может дать достаточной точности прогнозов на 20-25 лет. Применяемый в прогнозировании метод экстраполяции не дает точных результатов на длительный срок прогноза, потому что данный метод исходит из прошлого и настоящего, и тем самым погрешность накапливается. Этот метод дает положительные результаты на ближайшую перспективу прогнозирования тех или иных объектов не более 5 лет.

Для нахождения параметров приближенных зависимостей между двумя или несколькими прогнозируемыми величинами по их эмпирическим значениям применяется метод наименьших квадратов. Его сущность состоит в минимизации суммы квадратов отклонений между наблюдаемыми (фактическими) величинами и соответствующими оценками (расчетными величинами), вычисленными по подобранному уравнению связи.

Однофакторные прогнозирующие функции

Это такие функции, в которых прогнозируемый показатель зависит только от одного факториального признака.

В научно-техническом и экономическом прогнозировании в качестве главного фактора аргумента обычно используют время. Вполне очевидно, что не ход времени определяет величины прогнозируемого показателя, а действие многочисленных влияющих на него факторов. Однако каждому моменту времени соответствуют определенные характеристики всех этих факториальных признаков, которые со временем в той или иной мере изменяются. Таким

образом, время можно рассматривать как интегральный показатель суммарного воздействия всех факториальных признаков.

В качестве фактора-аргумента в однофакторной прогнозирующей функции можно использовать не только время, но и другие факторы, если известна их количественная оценка на перспективу.

Наиболее простым из методов прогнозирования является экстраполяция тренда явления (процесса) за истекший период. Тренд (или вековая тенденция) характеризует процесс изменения показателя за длительное время, исключая случайные колебания. Тренд явления находят путем аппроксимации фактических уровней временного ряда на основе выбранной функции. Наиболее часто применяемые при прогнозировании функции показаны в табл. 1. В них фактор-аргумент обозначен символом t.

Таблица 1 Однофакторные прогнозирующие функции

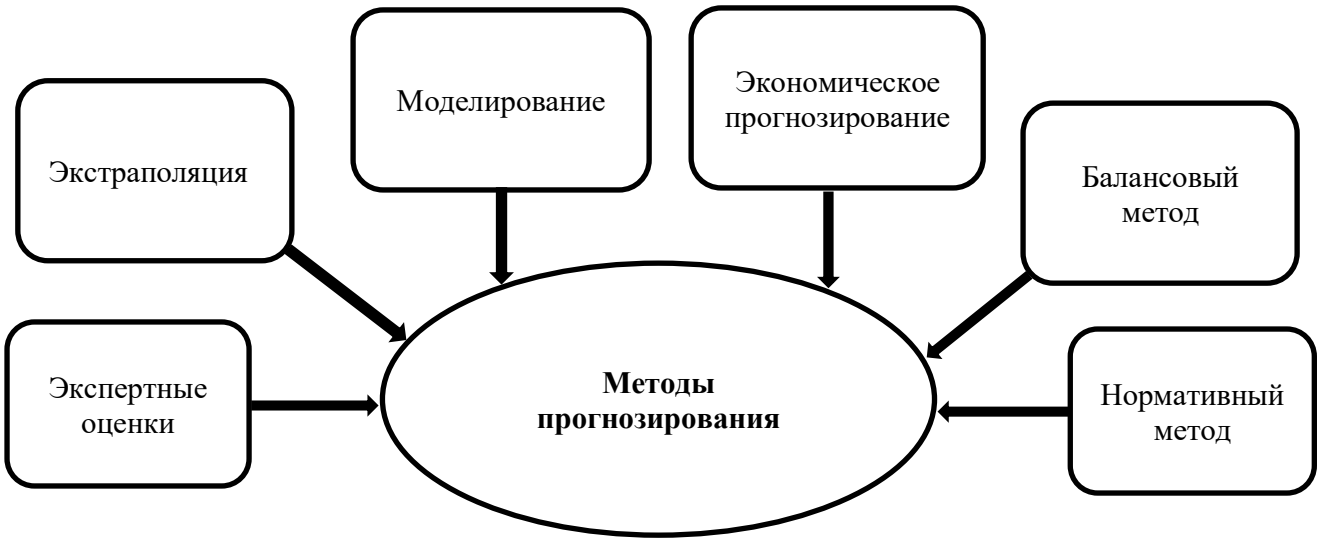
Наименования функции	Вид функции
Степенной полином	$y = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \ldots a_n t^n$
Парабола	$y = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$
Линейная функция	$y = a_0 + a_1 t$
Экспоненциальная (показательная)	$y = e^{a_0 + a_1 t + a_2 t^2}, y = e^{a_0 + a_1 t}$
Степенная	$y = a_0 t^{a_1}$
Логарифмическая	$y = a_0 + a_1 \ln t$
Комбинация линейной и логарифмической функций	$y = a_0 + a_1 t + a_2 \ln t$
Функция Конюса	$y = t(a_0 + a_1 \ln t)$
Функция Торнквиста	$y = \frac{a_0 t}{a_1 + t}$
Логистическая (сигмоидальная)	$y = \frac{a_0}{1 + a_1 e^{-a_2 t}}$
Частный случай логистической функции	$y = \frac{1}{a_0 + a_1 e^{-t}}$
Гипербола	$y = a_0 + \frac{a_1}{t}$, $y = a_0 + \frac{a_1}{t^y}$
Комбинация линейной функции и гиперболы	$y = a_0 + a_1 t + \frac{a_2}{t}$

Прогнозирование представляет собой сложный и многоэтапный процесс, в ходе которого необходимо решать большое количество разнородных задач: от сбора и обработки информации до выбора адекватных моделей и интерпретации полученных результатов. Существенное значение при этом имеет качество исходных данных, а также уровень неопределенности внешней среды. Для осуществления прогнозирования следует применять в сочетании различные методы прогнозирования, так как использование только одного подхода редко позволяет получить объективную и достоверную картину будущего. На сегодняшний день существует огромное множество методов прогнозирования, которые условно можно разделить на количественные и качественные, формализованные и экспертные. Однако на практике используется лишь ограниченное их число – примерно 15–20 методов, доказавших свою эффективность и универсальность.

В рамках данной работы особое внимание будет уделено наиболее популярным и широко применяемым методам прогнозирования, их основным характеристикам, преимуществам и ограничениям.

В настоящее время задачи прогнозирования широко применяются в различных областях науки и техники, включая радиотехнику, телекоммуникации, автоматизированные системы управления и анализ технического состояния оборудования. Разнообразие объектов прогнозирования и условий их функционирования обусловливает существование большого числа методов прогнозирования, отличающихся используемым математическим аппаратом, требованиями к исходным данным и областью практического применения. Выбор конкретного метода определяется характером прогнозируемого показателя, доступностью статистической информации и требованиями к точности и оперативности получения прогнозных оценок.

Рисунок 1 – Блок – схема наиболее популярные методы прогнозирования



ГЛАВА 2
МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Современные радиотехнические средства представляют собой сложные многофункциональные технические системы, предназначенные для приёма, передачи, обработки и отображения информации в различных диапазонах радиочастот. Их функционирование осуществляется в условиях априорной неопределённости, воздействия естественных и искусственных помех, а также влияния изменяющихся внешних и эксплуатационных факторов.

В связи с этим в процессе проектирования, разработки, модернизации и эксплуатации радиотехнических средств особую актуальность приобретает задача определения и прогнозирования показателей, характеризующих их техническое состояние, эффективность и качество функционирования.

Определение системы показателей радиотехнических средств является исходным и одним из наиболее ответственных этапов методики прогнозирования, поскольку именно на данном этапе формируется совокупность параметров, подлежащих анализу и последующей оценке. От корректности выбора показателей во многом зависят достоверность прогнозных оценок, адекватность используемых математических моделей и обоснованность принимаемых технических решений. Показатели радиотехнических средств должны в полной мере отражать их функциональные возможности, эксплуатационные свойства и экономическую целесообразность применения.

К числу наиболее значимых характеристик радиотехнических средств относятся технические показатели, которые определяют их функциональные и информационные возможности. Эти показатели непосредственно связаны с параметрами радиосигналов и характеристиками аппаратных и программных компонентов системы. К ним относятся рабочий диапазон частот, полоса пропускания, выходная мощность передающих устройств, чувствительность приемных трактов, динамический диапазон, коэффициент усиления, отношение сигнал/шум, а также точность измерения временных, частотных и амплитудных параметров сигналов.

Методика прогнозирования показателей радиотехнических средств представляет собой структурированный и последовательный процесс, направленный на получение обоснованных оценок будущего состояния и эксплуатационных характеристик радиоэлектронных систем различного назначения.

Рисунок 1 – Блок – схема этапов методики прогнозирования показателей РТС



1. Сбор и анализ исходных данных

На этом этапе осуществляется систематизация информации о РТС: технические характеристики, данные мониторинга, статистика отказов, условия эксплуатации и измеренные параметры работы системы. Определяются

ключевые показатели, которые будут прогнозироваться, и формулируются цели прогнозирования.

2. Выбор метода прогнозирования

Выбор подходящего метода зависит от объёма доступных данных, сложности системы и требований к точности прогноза. Основные методы включают аналитические подходы, имитационное моделирование, методы интеллектуальной обработки данных и машинного обучения, прогнозную экстраполяцию, а также волновой анализ и комбинированные подходы.

3. Построение математической модели

На данном этапе создаётся модель, отражающая работу РТС и динамику её показателей. Модель учитывает взаимодействие элементов системы, влияние внешних факторов, помех и шумов, а также особенности распространения сигналов.

4. Обработка и анализ данных

Данные проходят фильтрацию, проверку на полноту и корректность, нормализацию. Проводится выявление закономерностей, тенденций и аномалий в поведении показателей РТС. На этом этапе могут применяться методы статистического анализа и алгоритмы машинного обучения.

5. Прогнозирование показателей

Используя выбранную модель и обработанные данные, проводится прогнозирование ключевых показателей РТС на определённый период. Прогноз может корректироваться в процессе эксплуатации с учётом новых данных и изменяющихся условий работы.

6. Оценка точности прогнозов

Результаты прогнозирования проверяются на достоверность с использованием исторических данных, тестовых измерений и наблюдений. На этом этапе оцениваются точность и надёжность прогнозов, выявляются возможные отклонения и степень доверия к результатам.

7. Разработка рекомендаций и принятие решений

На основании полученных прогнозов формируются рекомендации по эксплуатации, техническому обслуживанию, модернизации РТС и оптимизации параметров работы системы для повышения надёжности и эффективности.

8. Масштабирование и интеграция

Заключительный этап предполагает адаптацию методики для комплексных радиотехнических систем, интеграцию с автоматизированными системами мониторинга и управления, что позволяет применять прогнозирование в реальном времени и управлять жизненным циклом РТС.

Выбор метода прогнозирования показателей радиотехнических средств является ключевым этапом при разработке любой методики анализа и оценки эффективности их функционирования. В условиях эксплуатации гражданских радиотехнических средств, характеризующихся высокой динамикой параметров, многофакторностью и неопределённостью внешних воздействий, требования к методам прогнозирования существенно возрастают. Необходимо обеспечить не только достаточную точность прогнозных оценок, но и их устойчивость, интерпретируемость и практическую применимость в рамках автоматизированных систем мониторинга и управления.

В настоящее время в Республике Беларусь сохранилась и продолжает активно развиваться производственная база по проектированию и производству сложных радиотехнических систем. Обеспечение выпуска современной и конкурентоспособной продукции – одна из главных задач производства. В ее решении важная роль отводится обоснованию тактико-технических характеристик создаваемого образца техники на этапе разработки тактико-технического задания и возможностей технической реализации его характеристик при производстве. Так, на этапе согласования тактико-технического задания, часто возникает проблема несоответствия требований, предъявляемых к характеристикам разрабатываемой радиотехнической системы, и возможностей их технической реализации.

ГЛАВА 3.
РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭКСТРАПОЛЯЦИИ

В данной главе представлены результаты прогнозирования показателей радиотехнических средств, полученные на основе применения метода экстраполяции. Выбор данного метода обусловлен его простотой, наглядностью и возможностью применения при ограниченном объёме статистических данных, что характерно для большинства радиотехнических систем, находящихся в эксплуатации. Метод экстраполяции позволяет получать количественные оценки будущих значений показателей РТС на основе анализа их динамики в предшествующий период времени и является эффективным инструментом краткосрочного и среднесрочного прогнозирования.

Исходными данными для проведения прогнозирования послужили результаты мониторинга эксплуатационных показателей радиотехнических средств за заданный временной интервал. В качестве анализируемых параметров

рассматривались показатели, наиболее полно характеризующие техническое состояние и эффективность функционирования РТС, включая энергетические характеристики, показатели качества приёма и передачи сигналов, а также отдельные показатели надёжности. Полученные временные ряды отражают реальные условия эксплуатации и содержат информацию о тенденциях изменения параметров во времени.

На первом этапе был проведён анализ динамики исходных данных с целью выявления общих тенденций изменения показателей радиотехнических средств. Анализ показал наличие выраженных трендовых составляющих для большинства рассматриваемых параметров, что обусловлено процессами старения элементной базы и изменением условий эксплуатации. Наблюдаемые колебания показателей относительно тренда объясняются воздействием внешних факторов и случайных помех. Полученные результаты подтвердили целесообразность применения метода экстраполяции для прогнозирования показателей РТС на заданный временной интервал.

Для построения прогнозных моделей использовались аппроксимирующие зависимости, описывающие выявленные тренды изменения показателей. В зависимости от характера динамики параметров применялись линейные и нелинейные формы экстраполяции. Выбор конкретной формы аппроксимирующей функции осуществлялся на основе анализа точности аппроксимации и минимизации погрешности между расчётными и фактическими значениями показателей на обучающем интервале, что позволило обеспечить адекватность моделей и повысить достоверность прогнозных оценок. Прогнозирование показателей радиотехнических средств осуществлялось на период, соответствующий горизонту планирования технического обслуживания и принятия управленческих решений. Полученные прогнозные значения позволили оценить ожидаемую динамику ключевых параметров РТС и выявить потенциальные риски ухудшения их эксплуатационных характеристик. Для ряда показателей было зафиксировано постепенное снижение значений, что указывает на необходимость проведения профилактических мероприятий или модернизации отдельных элементов системы.

Результаты прогнозирования показали, что метод экстраполяции обеспечивает достаточную точность оценки будущих значений показателей радиотехнических средств при условии сохранения текущих тенденций их изменения. Наибольшая точность прогнозов достигается при краткосрочном прогнозировании, тогда как при увеличении горизонта прогнозирования возрастает влияние неопределённостей и внешних факторов. Для оценки достоверности прогнозных результатов было выполнено сопоставление

прогнозируемых значений с фактическими данными за контрольный период, которое показало, что отклонения находятся в допустимых пределах.

Анализ прогнозных данных позволил рассмотреть возможные сценарии изменения состояния радиотехнических средств и определить временные интервалы, в течение которых показатели РТС сохраняют допустимые значения. Это создало основу для обоснования сроков проведения технического обслуживания, ремонта или модернизации оборудования. Полученные прогнозные оценки могут быть использованы для формирования количественных критериев оценки остаточного ресурса радиотехнических средств и поддержки принятия решений при управлении их эксплуатацией.

Практическая значимость результатов прогнозирования заключается в возможности их использования при планировании эксплуатации радиотехнических средств. Применение прогнозных оценок позволяет заблаговременно выявлять тенденции ухудшения характеристик системы, оптимизировать режимы работы РТС и рационально распределять ресурсы на техническое обслуживание. Использование метода экстраполяции способствует переходу от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, что особенно актуально для сложных радиотехнических комплексов.

Следует отметить, что метод экстраполяции, несмотря на присущие ему ограничения, является эффективным инструментом прогнозирования показателей радиотехнических средств при наличии устойчивых трендов и ограниченного объёма исходных данных. Полученные результаты подтверждают целесообразность его применения для решения практических задач прогнозирования на заданный срок. Вместе с тем для повышения точности прогнозов в условиях нестационарности целесообразно использование комбинированных подходов, включающих элементы адаптивного моделирования и интеллектуального анализа данных.

В целом проведённое прогнозирование показателей радиотехнических средств на основе метода экстраполяции продемонстрировало возможность получения обоснованных и практически значимых оценок будущего состояния системы. Результаты исследования подтверждают применимость данного метода в задачах прогнозирования эксплуатационных показателей РТС и его эффективность как инструмента поддержки принятия решений при управлении жизненным циклом радиотехнических средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях активного развития и широкого применения гражданских радиотехнических средств возрастает роль методов анализа и прогнозирования их показателей, направленных на повышение эффективности эксплуатации, надёжности и качества функционирования систем. Современные радиотехнические средства характеризуются высокой сложностью, многофакторностью и динамичностью процессов, что требует использования научно обоснованных и практически применимых методик прогнозирования, способных учитывать временные изменения параметров и влияние внешних условий. В связи с этим в магистерской диссертации была решена задача разработки методики прогнозирования показателей радиотехнических средств на основе метода экстраполяционного анализа.

В первой главе диссертационной работы выполнен анализ современного состояния проблемы прогнозирования показателей радиотехнических средств. Рассмотрены особенности функционирования гражданских радиотехнических систем и основные факторы, влияющие на формирование их эксплуатационных показателей. Проведён обзор существующих методов прогнозирования, включая статистические, регрессионные, имитационные и интеллектуальные подходы. Анализ показал, что ни один из рассмотренных методов не является универсальным и не обеспечивает требуемой точности и адаптивности при практическом применении в условиях реальной эксплуатации радиотехнических средств.

Особое внимание уделено сравнительному анализу наиболее распространённых методов прогнозирования, что позволило выявить их преимущества и ограничения с точки зрения работы с нестационарными данными, вычислительной сложности и интерпретируемости результатов. На основании проведённого анализа обоснована целесообразность применения метода экстраполяционного анализа в качестве базового инструмента прогнозирования показателей радиотехнических средств. Показано, что данный метод обеспечивает рациональный компромисс между точностью прогнозирования, вычислительной эффективностью и возможностью использования эксплуатационных данных.

Во второй главе диссертации выполнена постановка задачи разработки методики прогнозирования показателей радиотехнических средств и сформулированы требования к ней с учётом специфики функционирования гражданских радиотехнических систем и условий эксплуатации. На основе анализа задач прогнозирования разработаны основные принципы построения

методики, ориентированной на анализ временной динамики показателей. Обоснован выбор метода экстраполяционного анализа и разработан алгоритм реализации методики, включающий этапы формирования и предварительной обработки исходных данных, анализа статистических характеристик временных рядов, выбора и настройки экстраполяционной модели, построения прогнозных оценок и оценки их точности. Показано, что разработанная методика обладает гибкостью и может быть адаптирована к изменяющимся условиям эксплуатации за счёт корректировки моделей на основе новых данных.

В третьей главе диссертационной работы проведена экспериментальная проверка разработанной методики прогнозирования показателей радиотехнических средств. Экспериментальные исследования выполнены на основе временных рядов эксплуатационных показателей, отражающих функционирование радиотехнических систем в различных режимах работы. В ходе экспериментов выполнена оценка точности прогнозирования при различных горизонтах прогноза и условиях изменения параметров, что подтвердило практическую применимость предложенной методики.

Результаты, полученные в ходе выполнения магистерской диссертации, позволяют сделать вывод о достижении поставленной цели и решении сформулированных задач исследования. Разработанная методика обеспечивает получение обоснованных прогнозных оценок показателей радиотехнических средств и может использоваться в задачах поддержки принятия решений при управлении их эксплуатацией.

Научная новизна работы заключается в комплексном обосновании применения метода экстраполяционного анализа для прогнозирования показателей радиотехнических средств и разработке алгоритма методики, ориентированной на использование эксплуатационных данных и адаптацию к изменяющимся условиям функционирования системы. Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанной методики при проектировании и эксплуатации радиотехнических средств, а также при создании автоматизированных систем мониторинга и управления.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением методики прогнозирования за счёт учёта дополнительных внешних и структурных факторов, а также интеграцией экстраполяционного анализа с методами интеллектуальной обработки данных, что позволит повысить точность прогнозных оценок и расширить область применения разработанной методики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1979. – 576 с.: ил.
2. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей / Б.В. Гнеденко. – М.: Физматлит, 2011. – 448 с.: ил.
3. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир, 1994. – 406 с.: ил.
4. Лукин, В.П. Статистическая радиотехника / В.П. Лукин. – М.: Радио и связь, 1999. – 320 с.: ил.
5. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 2010. – 800 с.: ил.
6. Степанов, Б.М. Теория радиотехнических систем / Б.М. Степанов. – М.: Радио и связь, 1994. – 512 с.: ил.
7. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2021. – 768 с.: ил.
8. Ковальчук, М.В. Методы прогнозирования технического состояния систем / М.В. Ковальчук. – Минск: БГУИР, 2012. – 184 с.: ил.
9. Ямпольский, В.Г. Радиотехнические цепи и сигналы / В.Г. Ямпольский. – М.: Высшая школа, 1995. – 304 с.: ил.
10. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин; пер. с англ. – М.: Вильямс, 2016. – 1104 с.: ил.
11. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Введ. с 01.06.2016. – М.: Стандартинформ, 2020. – 20 с.
12. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. с 01.07.79. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 26 с.
13. ISO 9000:2015. Quality management systems — Fundamentals and vocabulary. – International Organization for Standardization, 2020.
14. Методические указания по выполнению магистерской диссертации для направления «Телекоммуникационные устройства и системы связи». – Минск: БГУИР, 2023. – 48 с.
16. Айвазян, С.А. Анализ временных рядов и прогнозирование / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М.: Финансы и статистика, 2011. – 432 с.: ил.
17. Кендэлл, М. Теория и практика анализа временных рядов / М. Кендэлл, А. Стюарт; пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 672 с.: ил.
18. Лукашин, Ю.П. Прогнозирование социально-экономических процессов: учебное пособие / Ю.П. Лукашин. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2013. – 343 с.: ил. (классический источник по экстраполяции трендов)

19. Баранов, В.А. Методы экстраполяции и прогнозирования временных рядов / В.А. Баранов. – М.: Радио и связь, 2000. – 256 с.: ил.
20. Chatfield, C. The Analysis of Time Series: An Introduction / C. Chatfield. – London: Chapman & Hall, 2014. – 352 p.: ill.
21. Rose, J.L. Ultrasonic Waves in Solid Media / J.L. Rose. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009. – 453 p.: ill.
22. Nettel, S. Wave Physics: Oscillations — Solitons — Chaos / S. Nettel, K. Gerlach. – Berlin: Springer, 2015. – 312 p.: ill.
23. Shnirman, A. Nonlinear Waves in Integrable and Non-integrable Systems / A. Shnirman. – Berlin: Springer, 2018. – 276 p.: ill.
24. Krenkurrevier, S.A. Acoustic Wave Theory: Fundamentals / S.A. Krenkurrevier. – London: Academic Press, 2015. – 364 p.: ill.
25. Richards, M.A. Principles of Modern Radar: Basic Principles / M.A. Richards, J.A. Scheer, W.A. Holm. – Raleigh: SciTech Publishing, 2020. – 960 p.: ill.
26. Mahafza, B.R. Introduction to Radar Analysis / B.R. Mahafza. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 412 p.: ill.
27. Whitaker, J.C. Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook / J.C. Whitaker. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 512 p.: ill.
28. Mahafza, B.R. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB / B.R. Mahafza, A.Z. Elsherbeni. – Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2014. – 720 p.: ill.