

УДК 621.39

doi: 10.53816/23061456_2025_9–10_21

**МЕТОДИКА ПРЕВЕНТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**THE METHOD OF PREVENTIVE IDENTIFICATION OF FAILURES OF
ELEMENTS OF THE AUTOMATED RADIO COMMUNICATION NETWORK
OF THE ARMED FORCES OF THE RUSSIAN FEDERATION**

А.А. Южакова

A.A. Yuzhakova

Военная академия связи им. С.М. Буденного

В статье представлена разработанная методика превентивной идентификации отказов элементов автоматизированной сети радиосвязи Вооруженных Сил Российской Федерации, которая применима при прогнозировании значений основных контролируемых параметров, вида технического состояния и необходима для превентивной идентификации отказов объекта контроля. Рассматривается отклонение наблюдаемой метрики от номинального значения как в меньшую, так и в большую сторону, выявляются запрещенные кодовые комбинации в описании временного ряда по динамике изменения значения контролируемого параметра и тенденции, учитывая области предотказа и параметрического отказа для своевременного принятия решения на управление параметрическим и/или аппаратным ресурсами, а также недопущения снижения боевой готовности всей сети.

Ключевые слова: автоматизированная сеть радиосвязи, превентивная идентификация отказов, прогнозирование, техническое состояние, техническое обслуживание.

The article presents the developed method of preventive identification of failures of elements of the automated radio communication network of the Armed Forces of the Russian Federation, which is applicable in predicting the values of the main controlled parameters, the type of technical condition and is necessary for the preventive identification of failures of the control object. The deviation of the observed metric from the nominal value is considered, both downwards and upwards, prohibited code combinations are identified in the description of the time series according to the dynamics of changes in the value of the controlled parameter and trends, taking into account the areas of pre-failure and parametric failure for timely decision-making on the management of parametric and/or hardware resources, as well as preventing a decrease in combat readiness of the entire networks.

Keywords: automated radio communication network, preventive fault identification, forecasting, technical condition, maintenance.

Сегодня реформирование Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) с широким внедрением средств автоматизации и робототехники ведет к сокращению числа пунктов управ-

ления, переходу на малообитаемые, необслуживаемые автоматизированные узлы связи и радиоцентры [1], что обуславливает выбор технически сложного объекта исследования, как «радио-

средство — радиоканал — автоматизированный радиоканал — автоматизированная сеть радиосвязи (АСРС)» [2].

К АСРС ВС РФ и ее элементам предъявляются высокие требования по надежности и высокой боеготовности, которые невозможно выполнить без знания истинного технического состояния в режиме реального времени и перехода к технологиям прогноза, что и обуславливает актуальность исследования.

Более того, резкий рост боевых повреждений по сравнению с потоком отказов мирного времени, удаленность от линии боевого соприкосновения ремонтных органов, осуществляющих средний и капитальный ремонты, активное применение противником высокочувствительных средств поражения по системе связи определяют актуальность перехода к стратегии технического обслуживания и ремонта по фактическому техническому состоянию, снижая число необоснованного ремонтного вмешательства для невыработавшего эксплуатационный ресурс изделия, например, радиоприемного (РПУ) или радиопередаточного устройства (РПДУ), как элементов АСРС ВС РФ.

Помимо этого, необходим переход и к прогнозной стратегии технического обслуживания и ремонта для снижения динамики развития неисправностей или их полного устранения, благодаря предварительному выявлению в ходе контроля технического состояния. Достоинства — увеличение срока службы и проведение только необходимых ремонтных мероприятий. Недостатки — высокие требования к компетенциям обслуживающего персонала, дополнительные затраты на развертывание систем контроля и необходимость разработки методик прогнозирования.

В связи с этим весьма актуальной является разработка методики превентивной идентификации отказов элементов АСРС ВС РФ, блок-схема алгоритма которой представлена на рис. 1–4.

Условно методику можно разделить на несколько этапов, причем:

— первый этап содержит выбор контролируемых параметров и разбиение размаха временного ряда на символы кода, соответствующие цифрам от –4 до +4, характеризующим уровни допусков на виды технического состояния объекта контроля. Если значение метрики наблюдаемого параметра находится в сегменте между ними, то это

означает назначение того или иного вида технического состояния [3]. А также уточнение эксплуатационных и назначение профилактических допусков, задание значений ошибок первого и второго рода, определение мощности алфавита кодирования временного ряда, выбор размера скользящего окна и введение запрещенных комбинаций;

— второй и третий этапы включают шаги по выбору метода обработки временного ряда [4] и выбору метода прогнозирования [5];

— четвертый этап предполагает выбор меры принятия решения на управление параметрическим или аппаратным ресурсами и актуализацию базы состояний [6].

Рассмотрим некоторые шаги методики более подробно.

Одним из подходов к выбору контролируемых параметров является коэффициент, характеризующий тяжесть последствий и критичность отказа элемента АСРС при возникновении аварии по причине выхода параметров за пределы установленных допусков, а также «вклад» каждого параметра в повышение показателя надежности объекта контроля — коэффициент значимости K_{Σ} [2]:

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n K_{\Sigma i};$$

$$K_{\Sigma l} > K_{\Sigma r} > K_{\Sigma k} > K_{\Sigma i} > K_{\Sigma n} \dots,$$

где $i = 1, 2, \dots, l, \dots, r, \dots, k, \dots, n^{-1}, n$ — общее число параметров.

Вариант перечня наблюдаемых параметров, выбор которых для каждого элемента АСРС индивидуален, представлен в таблице.

Назначение эксплуатационных допусков осуществляется в соответствии с режимом работы, профилактических — в соответствии с внешними условиями эксплуатации [7].

Задание значений ошибок первого рода $\alpha = \alpha_{\min}$ — «ложная тревога», ошибочное определение неработоспособного состояния объекта контроля при его функционировании и второго рода $\beta = \beta_{\min}$ — «пропуск отказа», ошибка принятия решения о работоспособности объекта контроля, когда он неработоспособен на допуск параметров элементов АСРС необходимо для повышения достоверности при определении вида технического состояния в различных условиях обстановки.

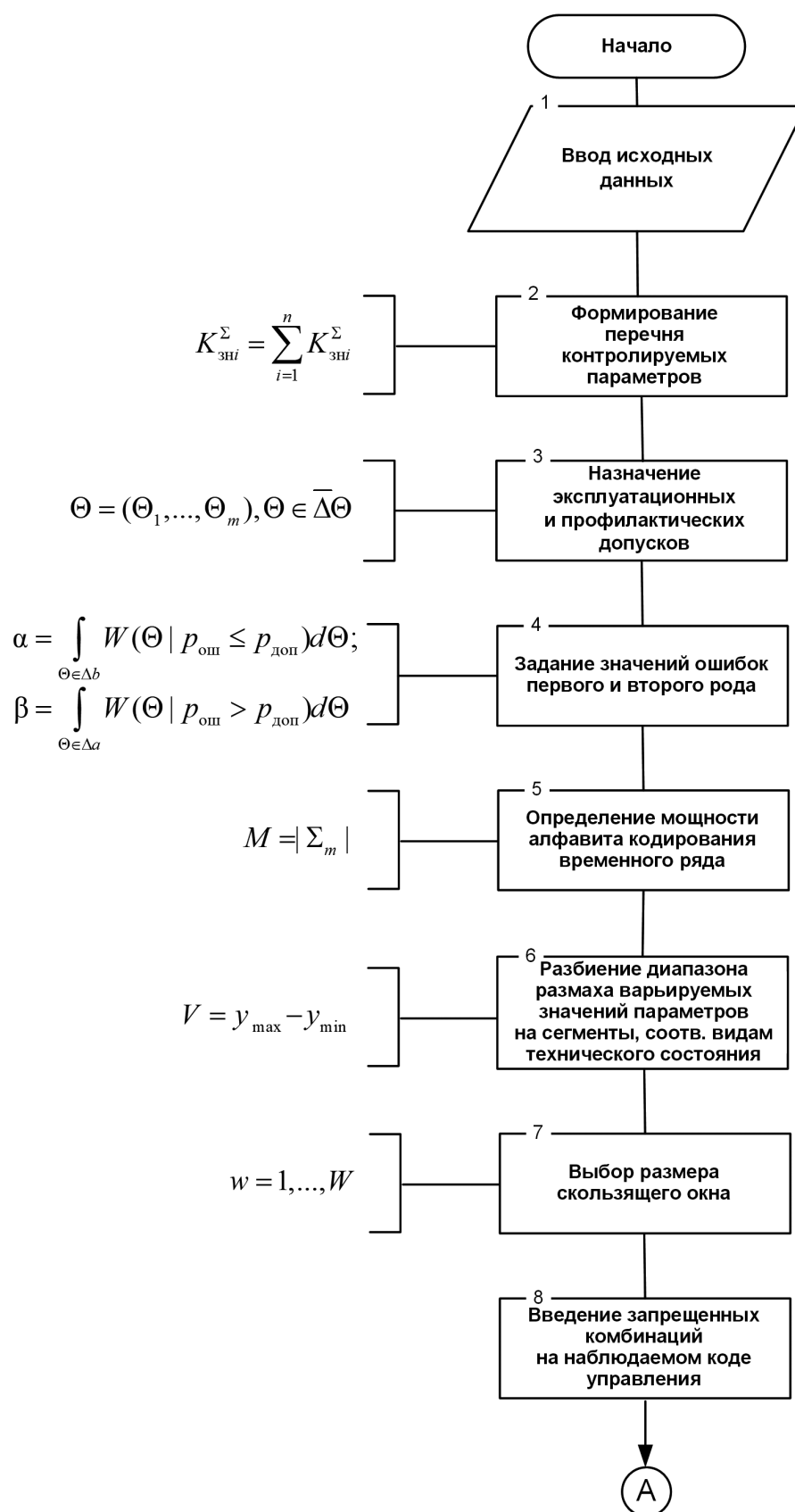


Рис. 1. Блок-схема алгоритма первого этапа методики

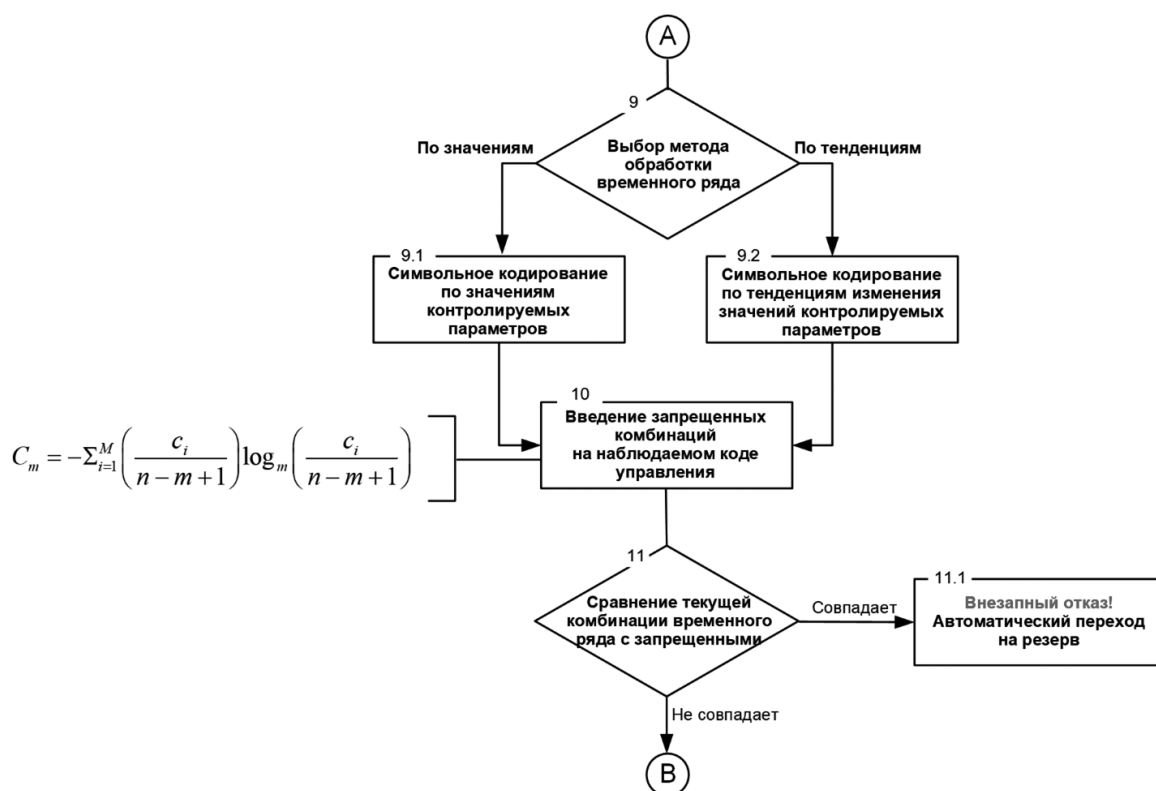


Рис. 2. Блок-схема алгоритма второго этапа методики

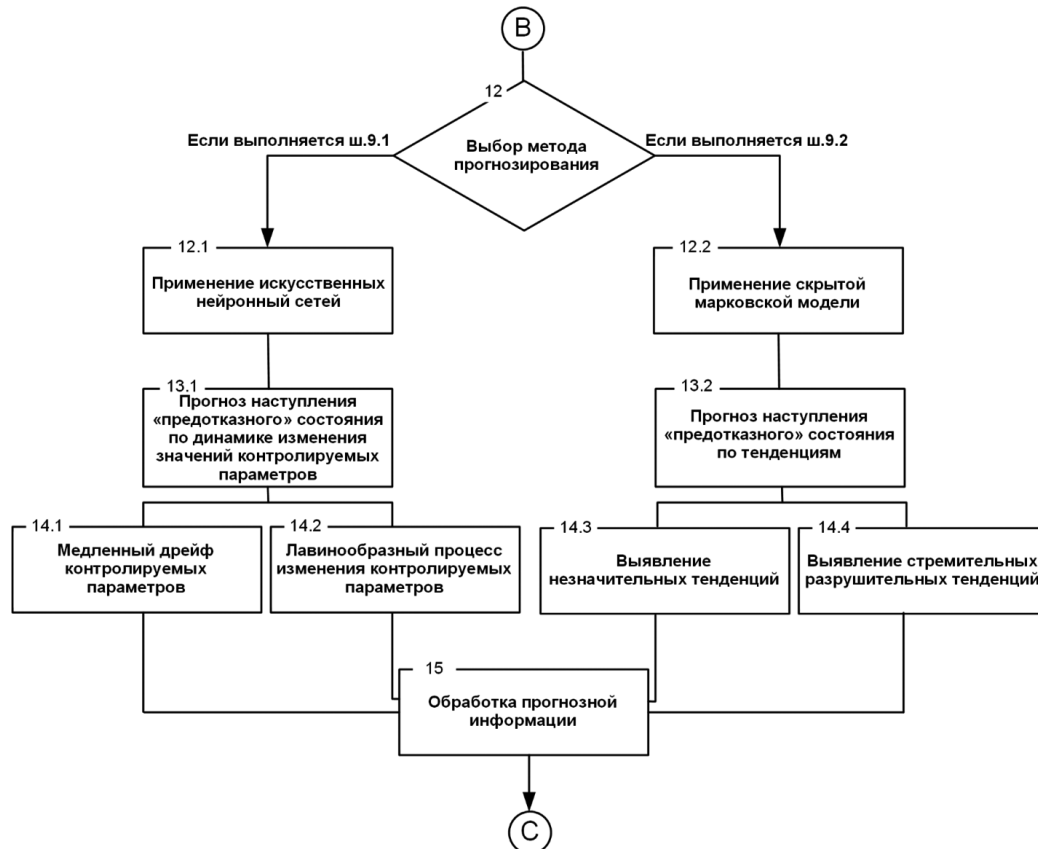


Рис. 3. Блок-схема алгоритма третьего этапа методики

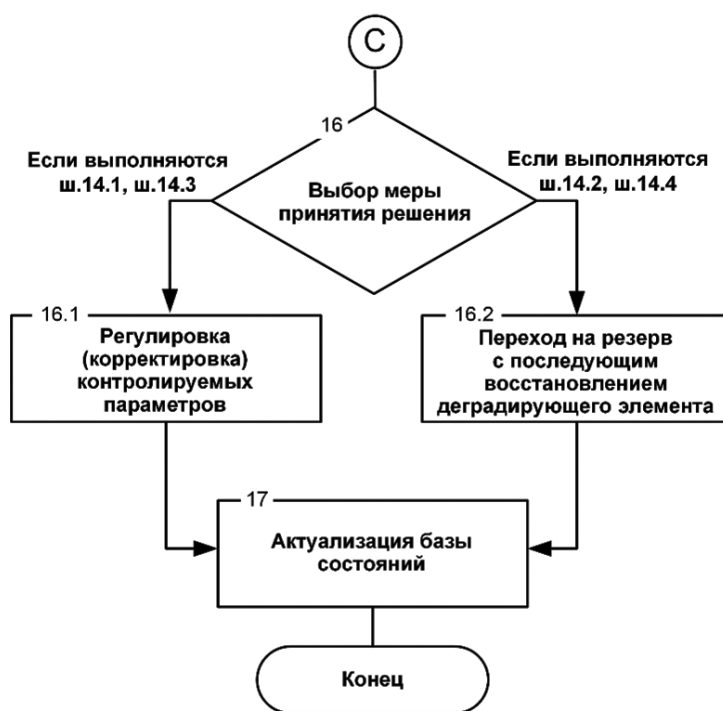


Рис. 4. Блок-схема алгоритма четвертого этапа методики

Мощность алфавита кодирования временно-го ряда $M = |\Sigma_m|$, где Σ_m — множество различных комбинаций.

Например, алфавит

$$\Sigma = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\},$$

каждое значение сопоставимо с видом технического состояния: 0 — исправное; 1 (–1) — работоспособное; 2 (–2) — предотказное; 3 (–3) — неработоспособное; 4 (–4) — предельное, при этом отклонение контролируемого параметра от номинального значения может быть, как в одну, так

и в другую сторону, поэтому имеем и положительные, и отрицательные значения.

Более того, для каждого контролируемого параметра выбирается размер скользящего окна, который для каждого отдельного элемента АСРС индивидуален. Ширина скользящего окна должна быть такой, чтобы минимизировать ошибки первого и второго рода и не пропустить нарастающие аварийной ситуации.

Состав запрещенных цифр и их комбинаций определяется с учетом набранной статистики. Например, для идентификации «предотказного» состояния такими цифрами являются «–2» и «2»,

Таблица

Перечень наблюдаемых параметров

Радиопередающие устройства (РПДУ)	Единицы измерения	Радиоприемные устройства (РПУ)	Единицы измерения
Частота задающего генератора	Гц	Частота опорного генератора	Гц
Амплитуда сигнала задающего генератора	В	Амплитуда сигнала опорного генератора	В
Выходной импеданс	Ом	Входной импеданс	Ом
Уровень выходной мощности	дБ	Производительность сигнального процессора	Гц
Краевые искажения	%	Коэффициент шума	дБ

для параметрического отказа, идентифицирующего «неработоспособное» состояние запрещенными цифрами и комбинациями являются «-3», «-2,-3», «2,3», «3», для функционального отказа, идентифицирующего «предельное» состояние запрещенными цифрами и комбинациями являются «-4», «-3,-4», «3,4», «4».

В качестве метода обработки временного ряда выбирается символьное кодирование по значениям или символьное кодирование по тенденциям.

Если измерение контролируемого параметра ведется на временных интервалах, то его значения представляют собой код управления в строке над алфавитом Σ . Путем прохождения по временному ряду строкой символов происходит его кодирование, при котором числовое значение f_i кодируется тем символом разбиения, в котором на текущий момент времени оно находится.

Например, $\Sigma_{\text{знач}} = \{0, 1, 0, 0, 1, 2, 2, \dots\}$,
 $\Sigma_{\text{знач}} = \{0, -1, -1, 0, -1, -2, -3, \dots\}$ и т.д.

Запрещенными кодовыми комбинациями при этом будут $\{0, 3\}$, $\{1, 4\}$, $\{1, -3\}$.

При кодировании временного ряда по тенденциям применяется алфавит $\Sigma_{\text{тенд}} = \{-, 0, +\}$, где «0» определяет отсутствие тенденции.

Важным моментом является выявление стремительных, разрушительных тенденций, вызывающих переход из «работоспособного» состояния в состояние отказа, поэтому необходимо определить запрещенные комбинации в описываемом временном ряде.

Например, запрещенные кодовые комбинации: $\{+, +\}$, $\{+, +, +\}$ или $\{-, -\}$, $\{-, -, -\}$.

Выбор метода прогнозирования является ключевым шагом методики, остановимся более подробно.

При выполнении шага 12.1, рис. 3, для решения задачи экстраполяции временных рядов, представляющих собой результаты измерений параметров в определенные моменты времени, исходя из множества статистических, вероятностных, методов на основе машинного обучения, а также гибридных методов, сочетающих в себе статистические модели и методы машинного обучения [8] предлагается применение рекуррентных нейронных сетей (РНС) [9], отличительной особенностью которых является наличие рекуррентного скрытого слоя, позволяющего за счет обратной связи запоминать

информацию об элементах последовательности и связях между ними, а также выявлять корреляцию между одномерными последовательностями многомерного ряда (рис. 5).

Техническое состояние элемента АСРС описывается вектором его параметров

$$\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_d)^T \in R^d,$$

где d — количество параметров.

Проиндексируем каждый вектор параметров $\mathbf{x}^t$ по временному шагу $t \in R^+$, означающему результаты измерений в момент времени t . Тогда множество измерений параметров образует временной ряд $\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \dots, \mathbf{x}^t$ и представляет собой набор объектов-признаков, на основе которых необходимо обучить РНС осуществлять прогнозирование значений вектора $\mathbf{x}^{t+1}$ в некоторый момент времени $t+1$, представляющими собой объекты-цели.

РНС можно представить в виде математической функции:

$$f(w, x_i): X \rightarrow Y,$$

где X — множество объектов-признаков;

Y — множество объектов-целей;

w — синоптические веса, присвоенные связям между нейронами сети.

Задача прогнозирования является частным случаем задачи регрессии и может быть сформулирована в следующем виде:

$$\{w_j\} = \arg \min_{w \in W} Q(w, X^l),$$

где $Q(w, X^l) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (f(w, x_i) - y_i)^2$ — средняя функция потерь на обучающей выборке $X^l = (x_i, y_i)_{i=1}^l$, объекты $x_i \in X$ и $y_i \in Y$ которой известны.

При этом следует заметить, что в зависимости от решаемой задачи прогнозирования, множество Y будет принадлежать пространствам разной размерности. В случае точного предсказания одного из параметров объекта контроля x_j , множество $Y \in R$, в случае интервального предсказания m значений одного из параметров радиопередающих устройств (РПДУ) $x_j^{T+1}, x_j^{T+2}, \dots, x_j^{T+m}$, множество $Y \in R^m$, при точном предсказании вектора параметров $\mathbf{x}^{T+1}$, множество $Y \in R^d$, а в случае

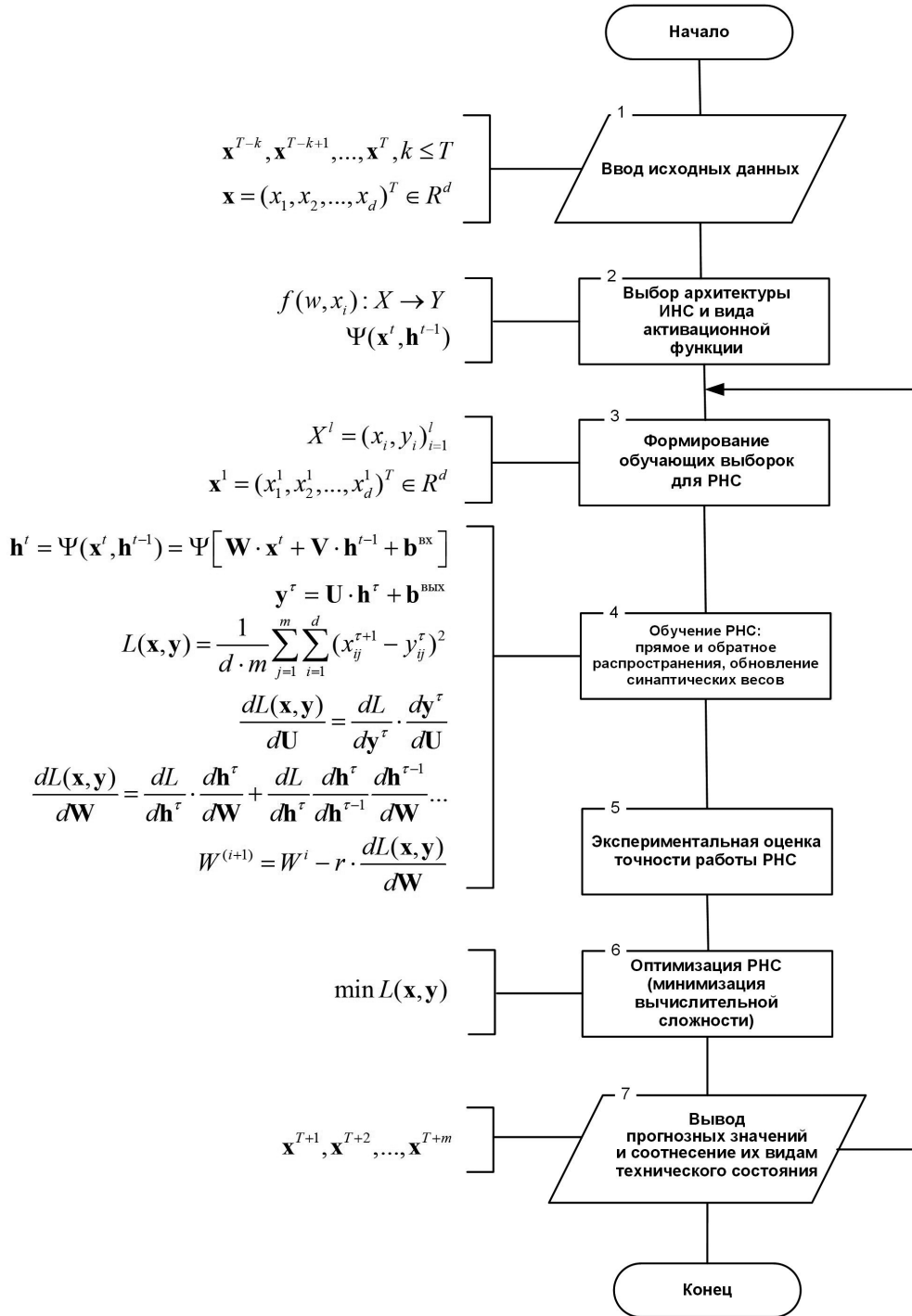


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы РНС

интервального предсказания вектора параметров $\mathbf{x}^{T+1}, \mathbf{x}^{T+2}, \dots, \mathbf{x}^{T+m}$, множество $Y \in R^{d \times m}$.

В любом случае выявляется либо медленный дрейф параметров от «предотказного» технического состояния к отказу, либо лавинообразный процесс изменения параметров.

В случае идентификации «предотказного» технического состояния элемента АСРС величина значения наблюдаемого параметра сверяется с профилактическим допуском на параметр.

При выполнении шага 12.2, рис. 3 предлагается использование скрытой марковской моде-

ли (СММ) и применение усовершенствованного ЕМ-алгоритма. При использовании предложенной модели [2] возникает возможность получить прогнозные оценки состояния элементов АСРС в течение ограниченного временного интервала. Эти оценки основываются на изменении таких видов технического состояния, как «работоспособное», «предотказное», «неработоспособное» и «предельное» с учетом анализа второстепенных признаков [2].

В этом случае предлагается модель:

$$\hat{X}_{t+1}^n = \mathbf{A}_t^n X_t^n + V_t^n;$$

$$\bar{Y}_t^{L,n} = \mathbf{B}X_t^n + W_t^n,$$

где $\hat{X}_{t+1}^n$ — вид технического состояния элементов АСРС;

$\mathbf{A} = [a_{ij}, i, j = \overline{1, S}]$ — матрица вероятностей смены состояний элементов АСРС;

S — число скрытых состояний;

$\bar{Y}_t^{L,n}$ — многомерный наблюдаемый процесс, характеризующийся изменением некоторых параметров $[vc_t; mn_t; avg_t; ins_t]$;

$\mathbf{B}$ — матрица вероятностей появления многомерных наблюдений, характеризующих процесс изменения параметров $[vc_t; mn_t; avg_t; ins_t]$;

V_t^n и W_t^n — технологический шум и шум измерения;

n — индекс элемента АСРС;

t — шаг наблюдения.

Блок-схема алгоритма работы СММ представлена на рис. 6.

При прогнозе наступления отказа элемента АСРС по тенденциям изменения выявляются как незначительные, так и стремительные, разрушительные тенденции — запрещенные коды управления. Заключительным и наиболее важным шагом является выбор меры принятия решения на управление надежностью элементов АСРС в зависимости от динамики изменения значений параметров или выявления тенденций.

При медленном дрейфе параметров от «предотказного» технического состояния к отказу (превышение допусков) или выявлении незначительных тенденций, принимается дальнейшее решение на управление параметрическим ресурсом — регулировка (например, изменение мощности излучения), корректировка (например, разворот антенны) и пр.

При лавинообразном процессе изменения параметров от «предотказного» технического состояния к отказу или выявлении стремительных, разрушительных тенденций (запрещенных кодов управления), принимается дальнейшее решение на управление аппаратным ресурсом (переход на резерв с последующим восстановлением деградирующего (основного) элемента АСРС).

На последнем шаге актуализируют базу состояний.

Таким образом, разработанная методика применима при прогнозировании контролируемых параметров и вида технического состояния элементов АСРС ВС РФ для своевременной регулировки (корректировки) параметров или переходу на резерв с дальнейшим восстановлением для поддержания в работоспособном (исправном) состоянии.

Теоретическая значимость методики заключается в дальнейшем развитии элементов теории надежности за счет совершенствование методик, алгоритмов идентификации вида технического состояния в целях обеспечения возможности превентивной идентификации отказа и выбора меры принятия решения на управление параметрическим (аппаратным) ресурсом.

Практическая значимость заключается в разработке теоретических положений до конкретных инструментов — реализация рекуррентных нейронных сетей и скрытой марковской модели в виде инженерных расчетных формул, алгоритмов и программ [10, 11], а также в возможности использования методики специалистами научно-исследовательских организаций в области контроля и прогнозирования при создании перспективных систем контроля.

Список источников

1. Николашин Ю.Л., Будко П.А., Жуков Г.А. Основные направления модернизации декаметрового звена связи // *Техника средств связи*. 2019. № 1 (145). С. 13–25.
2. Будко Н.П., Крюков О.В., Южакова А.А. Модель превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций // *Системы управления, связи и безопасности*. 2025. № 2. С. 138–242.
3. Аллакин В.В., Будко Н.П. Идентификация состояния узлов информационно-телекоммуника-

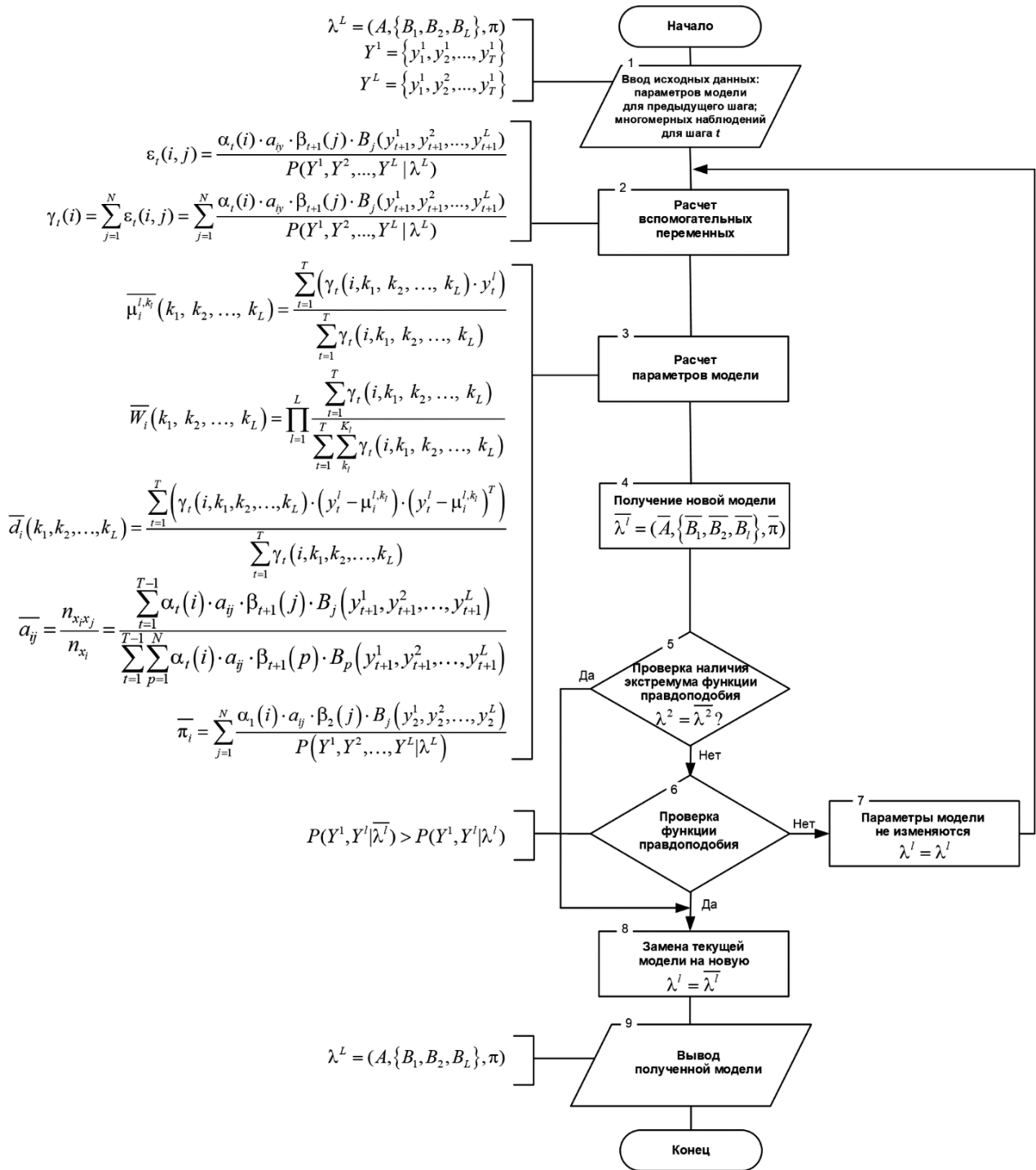


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы СММ

ционных сетей общего пользования подсистемой мониторинга информационной безопасности // Техника средств связи. 2020. № 3 (151). С. 58–64.

4. Аллакин В.В. Анализ методов оценки временных рядов сервером мониторинга инфор-

мационно-телекоммуникационной сети общего пользования // Техника средств связи. 2021. № 2 (154). С. 60–80.

5. Будко П.А., Шмидт А.А., Голунов М.В. и др. Анализ методов прогнозирования техниче-

кого состояния средств радиосвязи // IX Межвузовская научно-практическая конференция «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». Труды конференции: сб. материалов. СПб.: ВАС, 2024. С. 45–49.

6. Способ интеллектуального мониторинга состояния информационно-телекоммуникационной сети: пат. 2841123 Рос. Федерация. № 2024133867; заявл 12.11.24; опубл. 03.06.25. 42 с.

7. Абрамов О.В. Параметрическая коррекция в задачах управления техногенными рисками // Информатика и системы управления. 2023. № 3 (77). С. 63–73.

8. Чихачев А.В., Будко П.А., Шмидт А.А. Применение алгоритмов машинного обучения для решения задач прогнозирования технического состояния средств радиосвязи // Телекоммуникации и связь. 2024. № 3 (03). С. 33–39.

9. Южакова А.А., Будко П.А., Алисевич Е.А. Применение рекуррентных нейронных сетей для превентивной идентификации отказа объекта контроля // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXXI Международной научно-технической конференции. В 6 т. Воронеж, 15–17 апреля 2025 года. Воронеж. Издательский дом ВГУ, 2025. С. 298–304.

10. Южакова А.А. Программа расчета прогнозных значений контролируемых параметров, необходимых для превентивной идентификации отказа объекта контроля с применением рекуррентных нейронных сетей: свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2025615788 от 07.03.2025, ФСИС.

11. Южакова А.А. Программа расчета прогнозных оценок вида технического состояния объекта контроля с применением скрытой марковской модели: свидетельство о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2025668235 от 11.07.2025, ФСИС.

References

1. Nikolashin Yu.L., Budko P.A., Zhukov G.A. The main directions of modernization of the decimeter communication system // Communications equipment. 2019. No 1 (145). Pp. 13–25.

2. Budko N.P., Kryukov O.V., Yuzhakova A.A. A model of preventive identification of failures of telecommunications devices and systems // Management, communication and security systems. 2025. No 2. Pp. 138–242.

3. Allakin V.V., Budko N.P. Identification of the state of nodes of information and telecommunication networks of general use by the subsystem of information security monitoring // Communications equipment. 2020. No 3 (151). Pp. 58–64.

4. Allakin V.V. Analysis of time series estimation methods by the monitoring server of a public information and telecommunication network // Communication equipment. 2021. No 2 (154). Pp. 60–80.

5. Budko P.A., Schmidt A.A., Golyunov M.V. et al. Analysis of methods for predicting the technical condition of radio communications // IX Interuniversity scientific and practical Conference «Problems of technical support of troops in modern conditions». Proceedings of the conference: Collection of materials. Saint Petersburg: VAS, 2024. Pp. 45–49.

6. Patent for invention No. 2841123 RU dated 06/03/2025. A method of intelligent monitoring of the state of an information and telecommunication network. Application No. 2024133867 dated 11/12/2024. published: 06/03/2025. 42 p.

7. Abramov O. V. Parametric correction in the tasks of managing technogenic risks // Informatics and management systems. 2023. No 3 (77). Pp. 63–73.

8. Chikhachev A.V., Budko P.A., Schmidt A.A. Application of machine learning algorithms for solving problems of forecasting the technical condition of radio communications // Telecommunications and Communications. 2024. No 3 (03). Pp. 33–39.

9. Yuzhakova A.A., Budko P.A., Alisevich E.A. Application of recurrent neural networks for preventive identification of control object failure // Radar, navigation, communications: Proceedings of the XXXI International Scientific and Technical Conference. In 6 vol., Voronezh, April 15–17, 2025. Voronezh: VSU Publishing House, 2025, Pp. 298–304.

10. Yuzhakova A.A. Program for calculating the predicted values of controlled parameters necessary for the preventive identification of the failure of the control object using recurrent neural networks. Certificate of state registration of the computer program No. 2025615788 dated 03/07/2025, FSIS.

11. Yuzhakova A.A. Program for calculating predictive estimates of the type of technical condition of a control object using a hidden Markov model. Certificate of state registration of the computer program No. 2025668235 dated 07/11/2025, FSIS.