

УДК 656.7

Прогнозирование отказов контролируемых комплексов связи специального назначения

Винограденко А. М.

Аннотация. Эволюция новых видов вооружений, внедрение роботизированных автономных комплексов определяет вектор непрерывного развития комплексов связи специального назначения, характеризуемых их как объекты особой значимости, безаварийное функционирование которых является залогом устойчивой работы систем управления. Предполагается, что реальное техническое состояние комплексов связи можно оценить по результатам контроля их параметров, а прогнозирование изменений параметров позволит эксплуатировать объект до появления признаков опасного снижения надежности. Способность спрогнозировать возможный момент отказа особенно важно для таких объектов, возникновение отказов, сбоев и неисправностей в которых связана с существенными материальными, катастрофическими последствиями, поэтому предотвращение отказов комплексов связи специального назначения является первостепенной задачей. **Цель работы** заключается в разработке способов прогнозирования технического состояния комплексов связи специального назначения. **Используемые методы:** прогнозирование технического состояния комплексов связи специального назначения осуществляется на основе нейросетевого подхода с использованием дискретного вейвлет-преобразования, что позволяет точность и достоверность прогнозных оценок. **Новизна работы** заключается в реализации перспективного подхода к прогнозированию технического состояния комплексов связи специального назначения, имеющих гарантированно подтвержденные характеристики, основанного на интеллектуальной технологии прогнозирования, обеспечивающей комплексный учет контролируемых факторов с использованием базы знаний о типах состояния, полученных в результате нейросетевого прогнозирования с последующей фильтрацией полезного сигнала на основе дискретного вейвлет-преобразования, что существенно позволяет повысить точность прогноза. **Результат:** в основу перспективных систем проактивного контроля технического состояния комплексов связи специального назначения должны лечь способы нейросетевого прогнозирования с дальнейшим применением вейвлет-анализа в процессе оценки результатов прогнозирования. Использование дискретного вейвлет-преобразования в процессах прогнозирования позволит значительно увеличить возможности фильтрации сигналов, за счет удаления ложных отказов из сигнала локально вблизи окрестности некоторой точки при минимальном изменении полезного сигнала. **Практическая значимость:** результаты исследования можно использовать в процессе контроля технического состояния комплексов связи специального назначения, что позволит избежать аварийных ситуаций при функционировании объектов особой значимости, характеристики которых гарантированно подтверждены.

Ключевые слова: техническое состояние, комплексы связи специального назначения, нейросетевое прогнозирование, дискретные вейвлет-преобразования, интеллектуальные технологии.

Введение

Вектор развития Вооруженных сил Российской Федерации предопределенный развитием науки и технологий, ростом новых видов вооружений, внедрением роботизированных видов вооружений и потребностью достижения ин-

Библиографическая ссылка на статью:

Винограденко А. М. Прогнозирование отказов контролируемых комплексов связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 222-237. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10308.

Reference for citation:

Vinogradenko A. M. Prediction of failures of controlled special-purpose communication systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 3, pp. 222-237 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10308

формационного превосходства над противником в совокупности с усложнением и удорожанием элементов технической основы системы управления, указывает на необходимость разработки принципиально новых подходов, направленных на повышение эффективности процессов управления.

Активно развивающиеся в последнее время виды вооружения, основанные на новых прорывных технологиях, являются объектами особой важности, от устойчивой работы которых зависят вопросы обороноспособности государства. Комплексы связи (КС) специального назначения (СН) являются сложными техническими объектами, в которых даже кратковременное пропадание или существенное искажение данных о протекающих в них процессах, контролируемых с помощью существующих средств измерений, является неприемлемым с точки зрения выполнения требований по безопасности и надежности. Примерами характеристик таких объектов могут являться такие показатели надежности, как средняя наработка до отказа, коэффициент оперативной готовности и др., требования к которым в нормативно-технической и (или) в конструкторской документации заведомо высокие. Подобные КС «высокой надежности» выполняют задачи, связанные с высокими требованиями по оперативности, точности, живучести специальных объектов в рамках различных звеньев управления, сопряженные с гарантированным доведением приказов (команд) для их выполнения [1-3].

Целью статьи является представление результатов исследования процесса прогнозирования технического состояния (ТС) контролируемых КС СН, характеризующихся высокими требованиями, предъявляемых к ним по безопасности и надежности. Материал статьи декомпозирован на следующие подразделы:

- 1) комплексы связи специального назначения – как объекты контроля (ОК) особой значимости;
- 2) эволюция ТС КС СН;
- 3) анализ известных работ в области прогнозирования ТС сложных технических объектов;
- 4) гарантированный подход в задачах прогнозирования ТС;
- 5) нейросетевой подход и дискретные вейвлет-преобразования в задачах гарантированного прогнозирования.

1. Комплексы связи специального назначения – объекты контроля особой значимости

Управление объектами особой значимости, с учетом постоянно изменяющихся условий функционирования, растущей динамикой совершенствования КС (например, постоянной сменяемостью поколений радиостанций для различных звеньев управления) требует непрерывного или дискретного контроля и анализа ТС объекта. Предполагается, что реальное ТС КС можно оценить по результатам контроля (измерения) его параметров, а прогнозирование их изменений позволяет эксплуатировать объект до появления признаков опасного снижения надежности, исключив при этом преждевременные вмешательства в его работу, имеющих зачастую сомнительную полезность для надежности функционирования. Способность спрогнозировать возможный момент отказа

особенно важно для таких ОК, возникновение отказов, неисправностей и дефектов (с потерей работоспособности) в которых связана, как минимум, с большими материальными потерями, как максимум – с катастрофическими, глобальными последствиями. Предотвращение отказов для таких объектов является первостепенной задачей. Вместе с тем, специфика эксплуатации многих из них не позволяет решить эту задачу даже при непрерывном контроле их состояния, поскольку с течение определенных промежутков времени эксплуатации техническое обслуживание, дистанционные регулировки (смена режимов работы, резервирование) становятся невозможными (например, при выполнении специальных заданий, операций, в течении сеансов связи или слежением за целью для летательных аппаратов – во время полета, а для надводных и подводных судов – во похода (миссии) и т.д.). Для многих КС СН непрерывный контроль осуществлять невозможно, а при дискретном контроле каждая оценка их фактического состояния часто связана с существенными материальными затратами. В этих случаях прогнозирование позволяет решать задачу назначения оптимальных моментов контроля, в промежутках между которыми отказа не произойдет [4-5].

Исторически, управление ТС подобных развивающихся ОК, подходы к такому управлению и их практическому воплощению, в основном базировались на результатах и достижениях теории надежности, учитывающей внезапные и постепенные отказы, но укладывающихся в рамки марковских моделей старения систем. Однако любые процессы марковского или полумарковского типа не отражают влияния предыстории развития или поведения технического объекта на интервале эксплуатации T . При этом многие задачи, в том числе – учета данных наблюдений, остаются вне рамок принятой модели поведения КС СН. При этом задачи учета данных ТС, остаются вне рамок принятой модели поведения ОК. Соответственно, использование подходов и алгоритмов, построенных на основе марковских моделей старения редко бывает возможным применить на практике для обеспечения гарантированной безотказности объектов особой важности [4].

Воздействие на КС температуры, влажности, химической и других составляющих дестабилизирующих факторов (ДФ), ухудшает начальные характеристики контролируемых КС СН, что ускоряет процессы старения и, в целом, вызывает обратимые и необратимые деградации. В результате старения и износа возникают необратимые изменения параметров. Однако колебания температуры, влажности и других внешних факторов могут вызвать кратковременные отклонения параметров. Накопление применительно к одному и тому же КС различных воздействий приводит к изменению его показателей (параметров), а соответственно – к переходу в иное качественное состояние, вид (класс) ТС. Выход параметров за пределы допустимых значений является причиной отказа элементов КС [6].

2. Эволюция технического состояния комплексов связи специального назначения

Для оценки ТС КС с учетом корреляции подлежащих контролю параметров в работе предлагается использовать научно-методический аппарат теории эллипсоидов, когда область неопределенности D_n (1) в пространстве контролируемых параметров Y , характеризующаяся наличием погрешностей измерения Q по результатам многомерного контроля ТС КС СН аппроксимируется эллипсоидом $E(A_0, Q)$, так как другие методы не в полной мере позволяют учитывать корреляцию параметров ОК, что приводит к снижению достоверности результатов контроля [7]. Результаты проведенного анализа показали, что метод эллипсоидов наиболее применим для решения задач обработки неточных измерений величин контролируемых параметров КС СН [8].

Определено, что процесс оценки ТС ОК характеризуется перемещением области D_n (1), представленной на рис. 1, и представляет собой аффинное преобразование эллипсоидов в пространстве параметров, что позволяет повысить достоверность контроля и сформировать порядок действий по предупреждению аварии, прогнозирование ТС с целью своевременного резервирования элементов КС, а также КС СН в целом. Такие возможности дает эволюционное свойство множеств достижимости эволюционного процесса или управлений – $D_{\text{дост}}$ (2). Зная, $D_{\text{дост}}$ представляется возможным оценка приведения ОК в заданное состояние при наличии ДФ.

Использование множеств достижимости в процессе контроля КС с гарантированно подтвержденными характеристиками, основано на теории гарантированного (минимаксного) оценивания динамических систем, что позволяют минимизировать знания вероятностных характеристик внешних возмущений (ДФ) и ошибок измерения, которые редко бывают известны на практике [9]. Кроме того, представленный подход дает оценку фазового состояния, применяемую при каждой индивидуальной реализации контролируемого параметра Y элементов КС, а не в среднем. Область неопределенности D_n представляет собой начальное множество возможных значений n -мерного оцениваемого вектора выходных параметров $\bar{Y} = Y_1, Y_2, \dots, Y_n$, характеризующего ТС КС, принимающего произвольные значения из эллипсоида:

$$\bar{Y} \in E(A_0, Q) = \left\{ \left(Q^{-1}(Y - A_0), (Y - A_0) \right) \leq 1 \right\} = D_n; \quad (1)$$

$$D_{\text{дост}}(t, s, D_n) = D_{\text{дост}} \{ t, \tau, D_{\text{дост}}(\tau, s, D_n) \}, \quad (2)$$

где: $E(A_0, Q)$ – условное обозначение эллипсоида с параметрами A_0, Q ; A_0 – n -мерный вектор центра эллипсоида; Q – симметричная положительно определенная матрица размерности $n \times n$, характеризующая погрешность измерений и средств измерений; скобки $(\cdot)$ обозначают скалярное произведение векторов; s – начальный момент времени; t – любой заданный момент времени; τ – промежуточный момент времени.

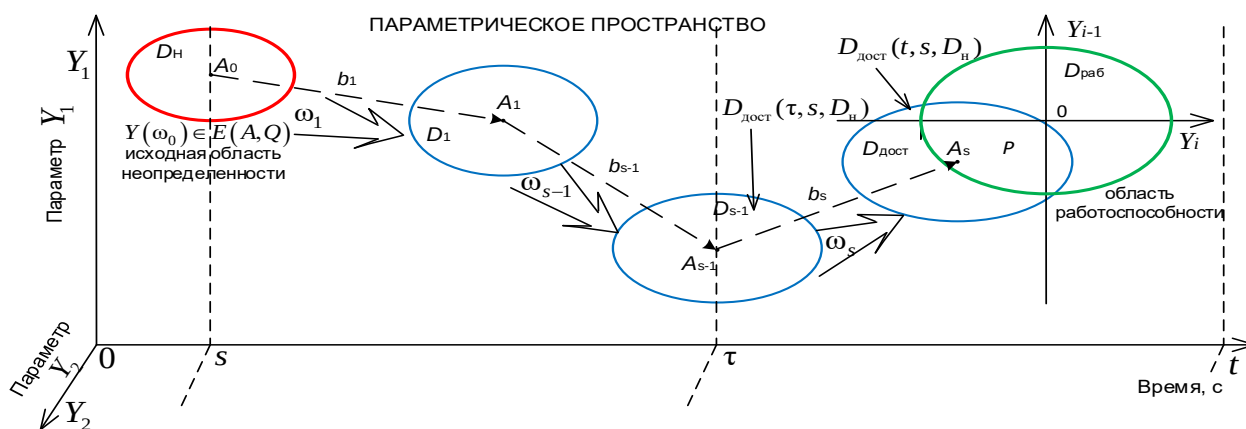


Рис. 1. Эволюция ТС КС СН

Процессы дрейфа параметров и вызываемые ими параметрические отказы в КС заставляют проводить специальные мероприятия, направленные на повышение эффективности (качества) функционирования системы связи. Осуществление таких профилактических и восстановительных мероприятий связано, как правило, с существенными материальными потерями. Своевременное выявление негативной динамики отклонения параметров за пределы допусков лежит в основе процесса контроля ТС КС, а предупреждение о возможном отказе через определенный диапазон времени – в основе прогнозирования, что способствует своевременным управляющим воздействиям для предупреждения аварийной ситуации и своевременному выполнению поставленной задачи.

Прогнозирование ТС можно рассматривать как целенаправленный процесс, который позволяет выявлять потенциальные отказы КС СН и обеспечивать своевременное принятие решений или выдачу управляющих воздействий до возникновения фактического отказа. Результаты прогнозирования позволяют: определить периодичность диагностирования, проводить предупредительные замены элементов КС, определять и обосновывать их; совершенствовать стратегии ТО; оптимизировать плановый выпуск изделий, средств их диагностики и контроля. Все эти цели способствует развитию перспективных методов технической эксплуатации до предотказного состояния.

3. Анализ известных работ в области прогнозирования технического состояния сложных технических объектов

Для успешной реализации задач прогнозирования ТС КС СН необходимо провести анализ существующих методов прогнозирования. На правильность выбора метода влияют количество априорной информации о прогнозируемом явлении, ее достоверность и адекватность. Прогнозирование ТС КС СН в общем случае можно разделить на два вида – эвристическое и математическое.

К методам аналитического прогнозирования [10] относят методы численного анализа с использованием интерполирующих функций. При выборе математического аппарата прогнозирования следует определить контролируемые параметры с учетом их корреляции. В процессе прогнозирования необходимо учитывать «чувствительность» к отклонению (изменению) контролируемых параметров от нормированных знаний при управляющих воздействиях.

Методы вероятностного прогнозирования [11] в основном зависят от закона распределения, характеризующих контролируемые параметры, нахождение в поле допусков которых, определяет ТС, а также вероятности выхода (невыхода) прогнозируемого процесса за допуски в следующий период времени. В основном, такие методы применяются в случаях, когда определить значение контролируемого параметра довольно сложно. Для реализации вероятностного прогнозирования ТС КС СН требуется большой набор статистических данных по конкретным элементам КС в разных условиях эксплуатации.

Известны методы статистической классификации [12], предусматривающие отнесение по выбранному правилу диагностируемого процесса ОК к одному из классов, причем их размер и количество определяются параметрической спецификой КС, что объединяет элементы КС, характеризующиеся идентичностью показателей состояния, совокупностью свойств и т. д.

Однако, основная трудность при решении задачи прогнозирования для стратегии эксплуатации по состоянию КС СН связаны с тем, что прогноз приходится осуществлять для каждого ОК индивидуально, при малых объемах исходной информации (по небольшому набору результатов контроля) и в присутствии помех (ошибок контроля), статистические свойства которых достоверно не известны, а также при воздействии ДФ. В этих условиях классические методы математической статистики и теории случайных процессов теряют свои привлекательные свойства, а их использование для прогнозирования приводит к существенным ошибкам и невысокой достоверности прогноза. С учетом этого, необходима разработка новых методов, подходов к решению задачи контроля и прогнозирования ТС КС СН при дефиците и низкой достоверности исходной информации, позволяющие получать достаточно надежные результаты, а также с учетом воздействия на ОК ДФ [13].

4. Гарантированный подход в задачах прогнозирования технического состояния

Известны подходы к решению задачи индивидуального прогнозирования при дефиците и неполной достоверности исходной (априорной) информации, позволяющие получать в этих условиях достаточно надежные результаты. К их числу относится метод гарантированного прогноза (МГП) [14], основная идея которого состоит в том, что из множества возможных реализаций случайного процесса деградации свойств (состояния) контролируемого ОК, выбираются те, которые находятся за пределами области работоспособности, которые идут выше (ниже) всех остальных.

Если в качестве модели случайного процесса изменения параметров, характеризующих ТС КС СН принять структуру в виде полиномов Чебышева со случайными коэффициентами, то наихудшими реализациями будут экстремальные полиномы Карлина, что позволяет построить конус прогноза (рис. 2), образованный двумя наихудшими реализациями внутренней и внешней области допусков, внутри которых на интервале прогноза будет гарантированно находиться истинная реализация случайного процесса изменения ТС КС. При этом, эллипсоидальная аппроксимация области достижимости на прогнозируемый

период эксплуатации (область работоспособности) позволяет повысить «контрастность» видов (классов) ТС ОК, а, соответственно, эффективность процесса оценивания ТС КС СН. Если «контрастность» области работоспособности КС является недостаточной для идентификации ТС, то при использовании аппарата дискретного вейвлет преобразования (ДВП) можно получить еще более «гарантированные» оценки [15, 16].

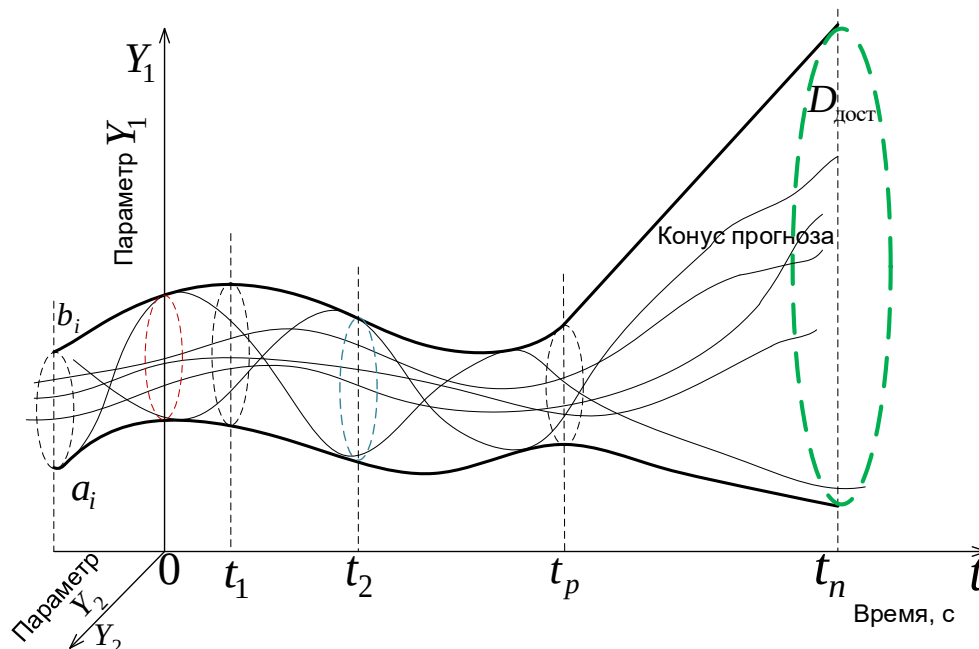


Рис. 2. Эволюция области работоспособности на прогнозируемый период

В отличие от традиционных вероятностно-статистических методов прогноза МГП позволяет получать решение при отсутствии сведений о вероятностных характеристиках ошибок наблюдения (ошибки первого и второго рода). МГП позволяет определить некоторую область, в пределах которой контролируемые параметры будут гарантированно находиться в любой заданный момент времени. Он обладает свойствами несмещенности, однозначности и оптимальности. Результаты прогноза позволяют назначать целесообразные моменты контроля ТС, а также профилактических и ремонтных работ.

5. Нейросетевой подход и дискретные вейвлет-преобразования в задачах гарантированного прогнозирования

С учетом специфики КС СН, задача контроля, прогнозирования его ТС является нелинейной, не поддающейся строгой формализации традиционными математическими методами. В особых условиях функционирования КС СН – при воздействии ДФ внешних (естественной природы), внутренних и противника (например, средства радиоэлектронного противодействия), когда решение задачи в общем виде невозможно, оправдан нейросетевой подход, позволяющий обеспечить достаточно высокое качество выполнения задачи.

Для решения задач аппроксимации нелинейностей важны методики, разрешающие проблемы принятия решений в условиях неполных данных (нехватки априорной, статистической информации) с учетом постоянно изменяющихся

условий окружающей среды, что позволяют возможности нейро-технологий. Нейронные сети (НС) не требуют традиционного программирования: информация обучения НС накапливается в весах, а не в программах, что обеспечивает устойчивость работоспособности сети. К другому достоинству НС следует отнести свойство обобщения, то есть способность сети давать правильные ответы на любые входные данные, не относящиеся к обучающему множеству.

В качестве прототипа использована обобщенная схема модели контроля ТС сложных технических объектов [17], в которой объединены две ИНС: самоорганизующаяся карта Кохонена и трехслойная гибридная нейросеть (рис. 3). Для фильтрации полученных на выходах нейросети значений показателей ТС и определения выходного класса $C_1, C_2, \dots, C_m$ (в соответствии с классами ТС), соответствующего текущему ТС КС СН, используются блоки, реализующие ступенчатую функцию с заданным порогом активации.

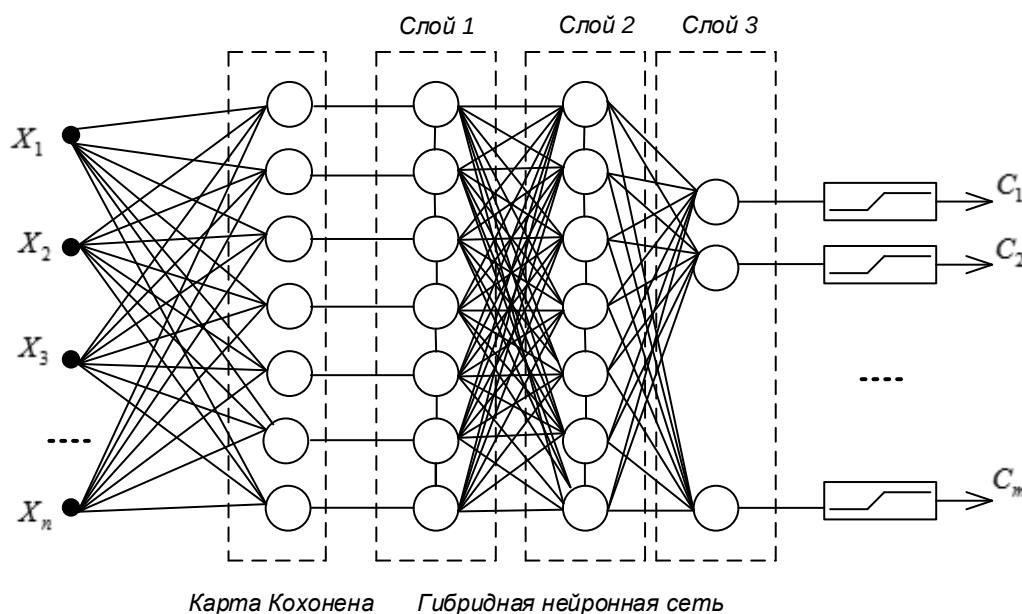


Рис. 3. Обобщенная схема модели контроля ТС КС СН

Разобьем результаты контроля ТС КС СН на обучающие последовательности $(X_1, X_2, \dots, X_n)$, состоящие из входного вектора и соответствующего ему выходного значения.

Карта Кохонена используется для первоначальной сортировки и кластеризации поступающих значений, она обеспечивает структуризацию исходных данных для нейросети, которая позволяет определить степень принадлежности совокупности значений показателей на своих входах определенному, ранее заданному классу, характеризующему текущее ТС КС.

Функционирование модели предполагает: кластеризацию значений показателей; обработку полученных значений при помощи нейросети; фильтрацию полученных значений и выделение целевого класса, определяющего текущее значение ТС КС.

Исходя из задач прогнозирования ТС КС, предлагается модель прогнозирования, которая, в отличие от рассмотренной имеет многослойный персеп-

трон, а также использование на выходе модели аппарата дискретного вейвлет преобразования (ДВП), что характеризует модель относительной простотой структуры и высокой точностью выходных данных (рис. 4).

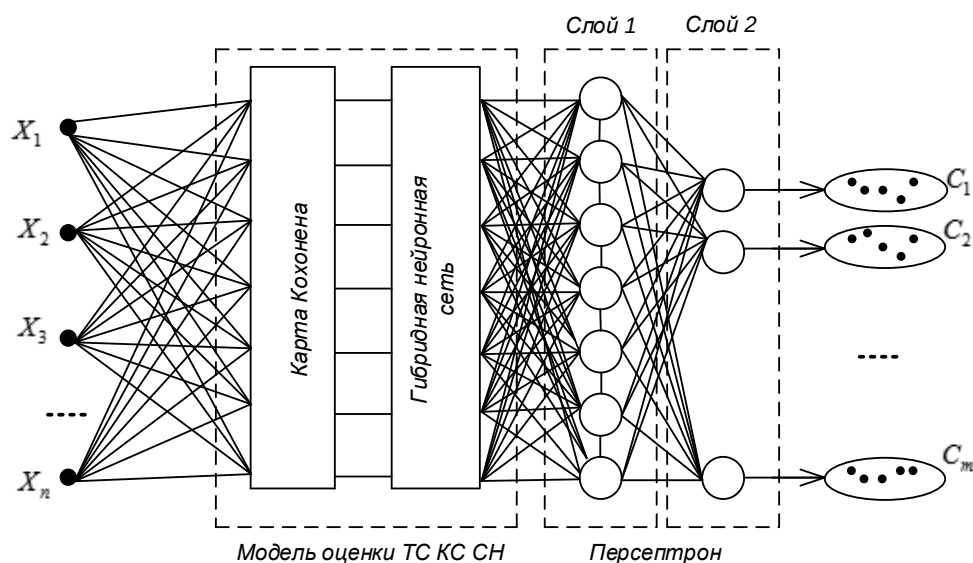


Рис. 4. Модель прогнозирования ТС КС СН

Персептрон играет в модели роль модуля прогнозирования, который получает на входы результаты работы нейросети, определяющие по совокупности показателей текущее ТС КС. Далее он формирует на выходах прогнозные значения, отражающие принадлежность ТС КС определенному классу состояний через заданный интервал времени. Результаты прогнозирования фильтруются блоками, реализующими фильтрацию полученных значений с использованием ДВП. Тем самым обеспечивается определение одного из результирующих классов ТС ($C_1, C_2, \dots, C_m$), характеризующих прогнозируемое ТС КС.

Функционирование модели прогнозирования предполагает:

- кластеризацию значений показателей;
- обработку полученных значений при помощи нейросети;
- формирование прогноза на основе выходных значений нейросети;
- фильтрацию полученных значений;
- выделение целевого класса, определяющего прогнозируемое ТС КС СН.

Использование метода ДВП, значительно упрощает процесс решения задачи комплексной прогнозной оценки ТС КС, отличающей данный метод от других, включающих задачи объединения методов отбраковки аномальных измерений, фильтрации и сжатия данных, выявления локальных особенностей измерительной информации (ИИ) и прогнозирования аварийных и нештатных ситуаций.

При этом отличительными являются следующие преимущества метода вейвлет-преобразований: возможность адекватного учета нелинейных режимов функционирования; работает значительно быстрее традиционных методов и применим в реальном масштабе времени; возможность фильтрации ИИ и ее восстановления в случае потери в процессе получения от КС [16].

Применение ДВП рассматривается с позиций использования его как инструмента, с помощью которого можно получить признаковое пространство для последующей разработки алгоритмов классификации импульсных сигналов. Выбор инструмента ДВП для решения задач распознавания и классификации обусловлен универсальностью математического аппарата вейвлет-анализа, его способностью адаптироваться к форме сигнала, сходностью тестовых сигналов с базисными функциями (вейвлетами).

Для более полного анализа каждого тестового сигнала, характеризующего техническое состояние объекта контроля, и соотнесению его определенному классу технического состояния, необходимо разложение сигнала в базисе вейвлетов. Выбор анализирующего вейвлета во многом определяется тем, какую информацию необходимо извлечь из сигнала. С учетом характерных особенностей различных вейвлетов во временном и в частотном пространстве, можно выявлять в анализируемых тестовых сигналах те или иные свойства и особенности, которые незаметны при наличии сильных шумов и деструктивных воздействий на КС. Таким образом, в процессе передачи сигналов ИИ необходимо учитывать накладывающиеся на тестовый сигнал помехи, шумы и условия внешней среды (влажность, внешняя температура, давление, запыленность и др.).

Предложенная аппроксимация областей работоспособности эллипсоидами позволила повысить контрастность классов ТС, и, соответственно, эффективность прогнозной оценки ТС (рис. 5), где $CA3(3)$, $CA2(2)$ – коэффициенты, характеризующие ТС ОК при различных аварийных ситуациях. При низкой контрастности классов, оценки результатов сложения областей работоспособности аппроксимированы результирующим эллипсоидом большего объема, что позволило получить более гарантированную оценку (рис. 6, в).

Контролируемый КС СН, являющийся многопараметрическим объектом, описываемый совокупностью параметров, для которых определены гарантированные допуски, характеризующие область работоспособности (достижимости), можно считать работоспособным, если все параметры находятся в пределах своих допусков и неработоспособным, если хотя бы один параметр из N контролируемых параметров КС выходит за пределы этой области. За обобщенный показатель качества КС СН W можно принять величину, вычисляемую как произведение характеристических функций областей допусков всех контролируемых параметров $D_{\Sigma\text{раб}}$:

$$W = \prod_{i=1}^N D_{\Sigma\text{раб}}, \quad (3)$$

где: $D_{\Sigma\text{раб}} = D_{\text{раб}i}(U_i)$ – суммарная (гарантированная) область работоспособности, включающая контролируемые процессы U_i ; N – общее количество параметров КС, причем

$$D_{\text{раб}i}(U_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } U_i \in D_{\Sigma\text{раб}}; \\ 0, & \text{при } U_i \notin D_{\Sigma\text{раб}}. \end{cases} \quad (4)$$

Схема принятия решения заключается в прогнозировании изменений каждого из параметров, сравнении результатов прогноза с областью своих допусков

и проведении соответствующих управляющих воздействий по моменту первого выхода одного из параметров за пределы области работоспособности $D_{\text{раб}}$.

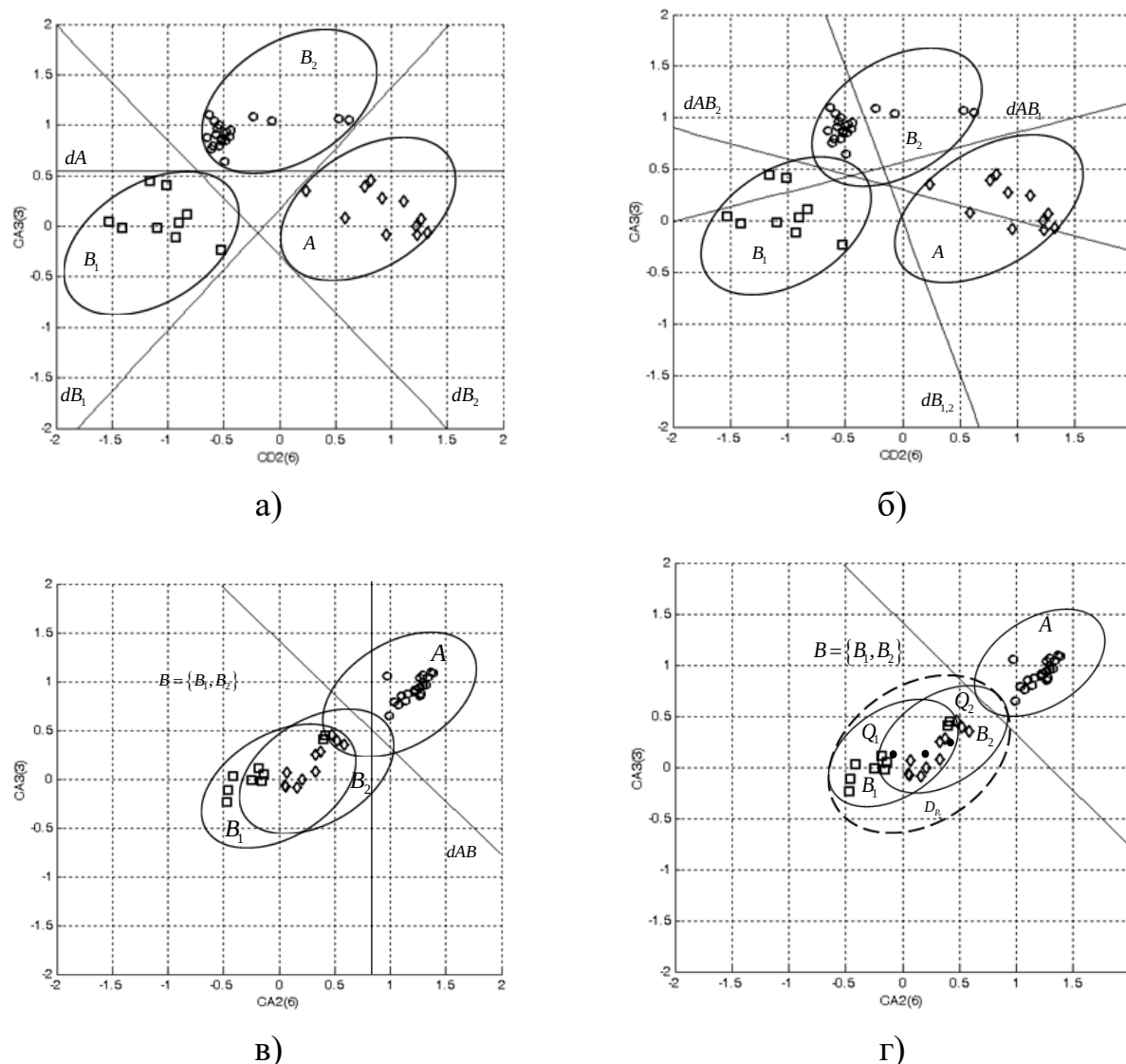


Рис. 5. Разделение классов ТС КС СН в виде областей работоспособности:
а) неперекрывающихся; б) частично перекрывающихся; в) перекрывающихся;
г) объединенных

Заключение

Использование метода эллипсоидов в процессе оценивании ТС КС, определении области работоспособности их элементов, позволяет более точно и гарантированно выделить границы допусков, соответствующие вероятностному состоянию (классу ТС) ОК, а также производить интегральный учет внешних и внутренних ДФ, что качественно отличает предлагаемый подход от существующих, представленных в работах [15-20]. Отличительной особенностью представленного подхода является использование вейвлет-преобразований получаемой ИИ, сочетающих объединение методов отбраковки локальных особенностей измерительной информации с прогнозированием аварийных, нештатных ситуаций благодаря комплексному учету внешних и внутренних ДФ. Это позволяет на качественно новом уровне проводить прогнозирующий контроль ТС

КС СН, и существенно увеличить область применения интеллектуальных систем контроля и прогнозирования.

Предложенный подход к распознаванию классов ТС КС СН по результатам нейросетевого прогнозирования позволит совершенствовать системы проактивного контроля ТС, повысит оперативность их функционирования, с учетом динамики изменения классов ТС контролируемых объектов, а также упростит математическое моделирование изменения ТС с учетом внешних и внутренних ДФ.

Литература

1. Яшин А. И., Будко П. А., Винограденко А. М. Интеллектуальный контроль технического состояния морского робототехнического комплекса // Морская радиоэлектроника. 2020. № 1 (17). С. 48-53.
2. Харченко А. В., Якимов В. Л. Метод обработки телеметрической информации в фазовом пространстве бортовых динамических систем космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2019. № 666. С. 91-101.
3. Лоскутов А. И., Ряхова Е. А., Горбулин В. И. Концептуальная модель технического диагностирования бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов на основе оптимальной реконфигурации в условиях априорной неопределенности появления неисправностей // Информационно-измерительные системы и управляющие системы. 2020. Т. 18. № 3. С. 43-55. DOI: 10.18127/j20700814-202003-05.
4. Абрамов О. В., Розенбаум А. Н. Управление эксплуатацией систем ответственного назначения. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 200 с.
5. Abramov O. V., Nazarov D. A. Condition-based maintenance by minimax criteria. Applied Mathematics in Engineering and Reliability // Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability. 2016. С. 91-94.
6. Федоренко В. В., Будко П. А. Расчет эксплуатационных допусков на параметры каналаобразующей аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2000. Т. 43. № 3-4. С. 55-60.
7. Vinogradenko A. M., Budko P. A., Fedorenko V. V. Adaptive System Monitoring of the Technical Condition Technological Objects Based on Wireless Sensor Networks // 2018 III International scientific Conference, (Convergent'2018) – Moscow, Russia, 29 November – 2 December, 2018. Communications in computing and information Science (CCIS, volume 1140) Springer, Cham. P. 200–210. DOI: 10.1007/978-3-030-37436-5 18.
8. Винограденко А. М. Эллипсоидальная аппроксимация областей параметрической неопределенности технического состояния робототехнических комплексов // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 3 (20). С. 53-60.
9. Chernousko F. L. State estimation for dynamic systems. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1994.

10. Сидорчук В. П. Методы прогнозирования технического состояния радиоэлектронного оборудования // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. Т. 15. № 10. С. 35-41.
11. Гаскаров Д. В., Голинкевич Т. А., Мозгалеvский А. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. М.: Советское радио. 1974. 224 с.
12. Клячкин В. Н., Карпунина И. Н., Федорова М. К. Оценка стабильности температурного режима компьютера // Автоматизация процессов управления. 2016. № 3 (45). С. 58-64.
13. Абрамов О. В. Планирование профилактических коррекций параметров технических устройств и систем // Информатика и системы управления. 2017. № 3 (53). С. 55-66.
14. Абрамов О. В. Технология предупреждения отказов технических систем ответственного назначения // XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014). – М., 2016. – С. 7540-7545.
15. Kotenko I. V., Budko P. A., Vinogradenko A. M., Saenko I. B. An Approach for Intelligent Evaluation of the State of Complex Autonomous Objects Based on the Wavelet Analysis // The 18th International conference on intelligent software methodologies, tools and techniques (SOMET'2019). Kuching, Sarawak, Malaysia, 23-25 September 2019. С. 25-38. DOI: 10.3233/FAIA190036.
16. Будко П. А., Жуков Г. А., Винограденко А. М., Гойденко В. К. Определение аварийного состояния морского робототехнического комплекса по многоэтапной процедуре контроля на основе использования вейвлет-преобразований // Морская радиоэлектроника. 2016. № 4 (58). С. 20-23.
17. Саенко И. Б., Скорик Ф. А., Котенко И. В. Мониторинг и прогнозирование состояния компьютерных сетей на основе применения гибридных нейронных сетей // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 10. С. 795-800. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-10-795-800.
18. Будко П. А., Винограденко А. М., Литвинов А. И. Экспериментальные исследования кинетического метода контроля и диагностики технических средств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9. С. 53-58.
19. Abramov O. V., Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems // Automation and Remote Control. 2016. № 77 (4). С. 594-603.
20. Будко П. А., Винограденко А. М., Гойденко В. К., Тимошенко Л. И. Метод многомерного статистического контроля технического состояния радиоэлектронного оборудования // Датчики и системы. 2018. № 3. С. 3-11.

References

1. Yashin A. I., Budko P. A., Vinogradenko A. M. Intellectuel'nyy kontrol' tehničeskogo sostoyaniya morskogo robototehničeskogo kompleksa [Intelligent monitoring of the technical condition of the marine robotic complex]. *Marine Radio electronics*, 2020, no. 1 (17), pp. 48-53 (in Russian).
2. Kharchenko A. V., Yakimov V. L. Metod obrabotki telemetricheskoy informacii v fazovom prostranstve bortovyh dinamicheskikh sistem kosmicheskikh

apparatorov [Method for processing telemetry information in the phase space of onboard dynamic systems of spacecraft]. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2019, no. 666, pp. 91-101 (in Russian).

3. Loskutov A. I., Ryahova E. A., Gorbulin V. I. Kontseptual'naya model' tehnikeskogo diagnostirovaniya bortovoy apparatury avtonomnih kosmicheskikh apparatorov na osnove optimal'noy rekonfiguratsii v usloviyah apriornoy neopredelennosti poyavleniya neispravnostey [A conceptual model for technical diagnostics of onboard equipment of Autonomous spacecraft based on optimal reconfiguration in conditions of a priori uncertainty of fault occurrence]. *Information and measurement systems and control systems*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 43-55. DOI: 10.18127/j20700814-202003-05 (in Russian).

4. Abramov O. V., Rozenbaum A. N. *Upravlenie ekspluatatsiey system otvetstvennogo naznacheniya* [Managing the operation of responsible purpose systems]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2000. 200 p. (in Russian).

5. Abramov O. V., Nazarov D. A. Condition-based maintenance by minimax criteria. *Applied Mathematics in Engineering and Reliability. Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability*, 2016, pp. 91-94.

6. Fedorenko V. V., Budko P. A. Raschet ekspluatatsionnykh dopuskov na parametry kanaloobrazuyushchej apparatury [The Calculation of operating tolerances on the parameters of the channel-forming equipment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Radioelektronika*, 2000, vol. 43, no. 3-4, pp. 55-60 (in Russian).

7. Budko P. A., Fedorenko V. V., Vinogradenko A. M. Adaptivnaya sistema monitoringa tehnikeskogo sostoyaniya tehnologicheskikh ob'ektov na osnove besprovodnih sensornih setey [Adaptive System Monitoring of the Technical Condition Technological Objects Based on Wireless Sensor Networks]. III Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Convergent'2018» [IIIrd International scientific Conference «Communications in computing and information Science» (Convergent'2018)]. Moscow, 2018, vol. 1140, Springer, Cham, pp. 200-210. DOI: 10.1007/978-3-030-37436-5 18 (in Russian).

8. Vinogradenko A. M. Ellipsoidal'naya approksimatsiya oblastey parametricheskoy neopredelennosti tehnikeskogo sostoyaniya robototekhnicheskikh kompleksov [Ellipsoidal approximation of areas of parametric uncertainty of the technical state of robotic systems]. *Robotics and technical Cybernetics*, 2018, no. 3 (20), pp. 53-60 (in Russian).

9. Chernousko F. L. State estimation for dynamic systems. Boca Raton, Florida, CRC Press, 1994.

10. Sidorchuk V. P. Metodi prognozirovaniya tehnikeskogo sostoyaniya oborudovaniya [Methods for predicting the technical condition of radio-electronic equipment]. *Information and measurement systems and control systems*, 2017, vol. 15, no. 10, pp. 35-41 (in Russian).

11. Gaskarov D. V., Golinkevich T. A., Mozgalevskiy A. V. *Prognozirovanie tehnikeskogo sostoyaniya i nadezhnosti radioelektronnoy apparatury* [Forecasting the technical condition and reliability of radio-electronic equipment]. Moscow, Soviet radio Publ., 1974. 224 p. (in Russian).

12. Klyachkin V. N., Karpunina I. N., Fyodorova M. K. To assess the stability of a temperature mode of the computer. *Automation of control processes*, 2016, vol. 45, no. 3, pp. 58-64 (in Russian).
13. Abramov O. V. Planirovanie profilakticheskikh korrektsij parametrov tekhnicheskikh ustrojstv i sistem. [Planning of preventive corrections of parameters of technical devices and systems]. *Information science and control systems*, 2017, no. 3 (53), pp. 55-66 (in Russian).
14. Abramov O. V. Tehnologiya preduprezhdeniya otkazov tekhnicheskikh system otvetstvennogo naznacheniya [Technology of prevention of failures of technical systems for critical applications] XII Vserossiyskoe soveshyanie po problemam upravleniya (VSPU-2014) [All-Russian meeting on management issues (VSPU-2014)]. Moscow, 2016, pp. 7540-7545. (in Russian).
15. Kotenko I. V., Budko P. A., Vinogradenko A. M., Saenko I. B. An Approach for Intelligent Evaluation of the State of Complex Autonomous Objects Based on the Wavelet Analysis. *The 18th International conference on intelligent software methodologies, tools and techniques (SOMET'2019)*. Kuching, Sarawak, Malaysia, 23-25 September 2019. Pp. 25-38. DOI: 10.3233/FAIA190036.
16. Budko P. A., Zhukov G. A., Vinogradenko A. M., Goydenko V. K. Determination of critical condition of a sea robotic complex according to the multi-stage procedure of control on the basis of use of veyvlet-transformations. *Sea radio electronics*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 20-23 (in Russian).
17. Saenko I. B., Skorik F. A., Kotenko I. V. Monitoring i prognozirovanie sostoyaniya komp'yuternih setey na osnove primeneniya gibridnih neyronnih setey [Monitoring and forecasting computer network state based on the use of hybrid neural networks]. *Izvestiya. vuzov. Priboroostroenie*, 2016, vol. 59, no. 10, pp. 795-800. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-10-795-800 (in Russian).
18. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Litvinov A. I. Pilot studies of a kinetic control method and diagnostics of technical means. *Mechatronics, automation, control*, 2014, no. 9, pp. 53-58 (in Russian).
19. Abramov O. V. Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems. *Automation and Remote Control*, 2016, no. 77 (4), pp. 594-603.
20. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Goydenko V. K., Timoshenko L. I. Metod mnogomernogo statisticheskogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya radioelektronnogo oborudovaniya [Method of multidimensional statistical control of the technical state of radio-electronic equipment]. *Sensors & systems*, 2018, no. 3, pp. 3-11 (in Russian).

Статья поступила 31 августа 2020 г.

Информация об авторе

Винограденко Алексей Михайлович – кандидат технических наук, доцент. Докторант. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: интеллектуальный контроль информационно-телекоммуникационных систем. E-mail: vinogradenko.a@inbox.ru
Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Prediction of failures of controlled special-purpose communication systems

A. M. Vinogradenko

Relevance: The evolution of new types of weapons, the introduction of robotic Autonomous systems determines the vector of continuous development of special-purpose communication systems, characterized as objects of special significance, the trouble-free operation of which is the key to the stable operation of control systems. It is assumed that the actual technical condition of communication systems can be assessed by monitoring its parameters, and forecasting their changes allows you to operate the object until there are signs of a dangerous decrease in reliability. The ability to predict the possible moment of failure is especially important for such objects, the occurrence of failures, failures and malfunctions in which is associated with significant material and catastrophic consequences, so preventing failures of special-purpose communication systems is a top priority. **The purpose of this work** is to develop methods for predicting the technical state of special-purpose communication systems. **Methods used:** forecasting the technical state of special-purpose communication complexes is based on a neural network approach using a discrete wavelet transform, which allows the accuracy and reliability of predictive estimates. **The novelty of this work** is to implement a promising approach to the prediction of technical condition of communication systems of special purpose, guaranteed with proven features based on the intelligent forecasting technology, providing a comprehensive account of controllable factors, using knowledge of the state types, the resulting neural network prediction followed by filtration of the useful signal based on discrete wavelet transform, significantly improves the accuracy of the forecast. **Results:** promising systems for proactive monitoring of the technical condition of special-purpose communication complexes should be based on neural network forecasting methods with further application of wavelet analysis in the process of evaluating the results of forecasting. The use of discrete wavelet transform in forecasting processes will significantly increase the ability to filter signals by removing false failures from the signal locally near the vicinity of a certain point with minimal change in the useful signal. **Practical significance:** the results of the study can be used in the process of monitoring the technical condition of special-purpose communication systems, which will avoid accidents when operating objects of special significance, the characteristics of which are guaranteed to be confirmed.

Key words: technical condition, special-purpose communication complexes, neural network forecasting, discrete wavelet transformations, intelligent technologies.

Information about Author

Alexey Mikhailovich Vinogradenko – PhD, Docent, Doctoral Candidate. Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: intellectual control of information and telecommunication systems. E-mail: vinogradenko.a@inbox.ru

Address: 194064, Russia, St. Petersburg, Tikhoretsky pr, 3.