

ЧАСТНЫЕ МОДЕЛИ ПРЕВЕНТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОТКАЗОВ: КУМУЛЯТИВНАЯ И ВЕРОЯТНОСТНО-ГРАФОВАЯ

Будко П.А.¹, Южакова А.А.²

DOI: 10.21681/3034-4050-2025-3-35-41

Ключевые слова: кумуляция, надежность, объект контроля, превентивная идентификация отказа, прогнозирование, профилактический допуск, техническое обслуживание, техническое состояние, эксплуатационный допуск.

Цель работы: состоит в разработке общей модели превентивной идентификации отказов для обоснованного перехода к более прогрессивным комплексным стратегиям технического обслуживания и ремонта, ориентированным на надежность: обслуживанию по фактическому состоянию, прогнозному обслуживанию.

Метод: системный анализ, теория графов, математическое моделирование.

Результаты исследования: предложена общая модель превентивной идентификации отказов объекта контроля, состоящая из двух частных: кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска» и вероятностно-графовой модели идентификации и прогнозирования отказа.

Первая частная модель позволяет рассчитать профилактические допуски на контролируемые параметры с учетом ошибок контроля первого и второго рода в интересах прогнозного обслуживания, вторая – получать аналитические зависимости для нахождения вероятности каждого вида технического состояния объекта контроля и финальных вероятностей для состояний с учетом ошибок прогнозирования первого и второго рода.

Разработанные частные модели превентивной идентификации отказов – кумулятивная модель отказа типа «параметр – поле допуска» и вероятностно-графовая модель идентификации и прогнозирования отказа предназначена для решения задач прогнозирования технического состояния объекта контроля.

Научная новизна: частные модели в совокупности, в отличие от существующих, учитывают не только области нормального функционирования и полного отказа, но и области предотказа и параметрического (скрытого отказа), что позволяет не допустить внезапного отказа, соответственно, не допустить простоя, обосновать пороги эксплуатационных и профилактических допусков.

Введение

Появление новых технологий мониторинга технического состояния объекта контроля, ориентированных на переход от пассивных методов контроля, констатирующих факт наступления отказа, к активным методам прогнозного контроля обосновывает потребность и созданные для этого условия перехода к стратегиям управления надежностью по фактическому состоянию и прогнозному обслуживанию. Прогнозирование надежности и технического состояния объектов контроля играет важную роль при индивидуальном планировании их эксплуатации [1]. Основные трудности при решении задачи прогноза для перехода к стратегии эксплуатации по фактическому состоянию связаны с тем, что прогнозирование необходимо осуществлять для каждого объекта индивидуально, при малых объемах

результатов контроля, а также при наличии помех и ошибок контроля, статистические свойства которых достоверно не известны. В таких условиях методы математической статистики теряют свою привлекательность, а их применение в интересах прогнозирования ведет к ошибкам и низкой достоверности прогноза.

Действительно, стратегия технического обслуживания по фактическому состоянию в последнее время привлекает все большее внимание специалистов. Ее называют индивидуальной, поскольку она ориентирована на реальное состояние и учитывает особенности конкретного объекта контроля, а не опыт многолетней эксплуатации аналогичных объектов и статистику, для корректного применения которых важна статистическая однородность (типаж) подконтрольного оборудования, а также значительные объемы измерительной информации [2, 3].

¹Будко Павел Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технического обеспечения связи и автоматизации Военной академии связи, ученый секретарь ПАО «Интелтех», г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: budko62@mail.ru

²Южакова Анна Алексеевна, адъюнкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: anutikaaa@mail.ru

Помимо этого, появление новых видов состояний, например, «предотказного» и «опасного» (ГОСТ 27.002-2015), несомненно, влечет за собой работу по совершенствованию научно-методического аппарата для перехода к новым стратегиям управления надежностью, в том числе в части прогнозного обслуживания [4].

Соответственно, предлагается общая модель превентивной идентификации отказов объекта контроля, состоящая из двух частных:

- кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска», позволяющей рассчитать профилактические допуски на контролируемые параметры с учетом ошибок контроля первого и второго рода в интересах проактивного обслуживания;
- вероятностно-графовой модели идентификации и прогнозирования отказа, позволяющей получать аналитические зависимости для нахождения вероятности каждого вида технического состояния объекта контроля и финальных вероятностей для состояний «работоспособное», «предотказное» и «неработоспособное» с учетом ошибок прогнозирования первого и второго рода.

Выходными данными модели будут минимально необходимое и максимально целесообразное поле допуска, значение профилактических допусков на контролируемые параметры и вероятности каждого вида технического состояния.

Также введены некоторые ограничения и допущения, например, модель разрабатывается

в интересах идентификации постепенных параметрических скрытых отказов, составляющих 90 % всех видов отказов [2, 3], а не внезапных, типа «боевые повреждения» и ошибки персонала; в исследовании выбираются наиболее значимые из множества контролируемых параметров, так как обеспечить повышение надежности путем улучшения качества контроля абсолютно всех параметров одновременно не представляется возможным; в исследовании рассматриваются виды технического состояния – «работоспособное», «предотказное», «неработоспособное», «предельное» («рабочее», «нерабочее», «исправное», «неисправное» и «опасное» не учитываются); в исследовании осуществлен учет исключительно параметрических и аппаратных ресурсов, а также управление ими, не беря во внимание частотные, энергетические и другие виды ресурсов.

Частная кумулятивная модель отказа типа «параметр – поле допуска»

Говоря об изменении модели надежности объекта контроля при переходе к передовым стратегиям технической эксплуатации [5, 6] предлагается модифицированная частная кумулятивная модель отказа типа «параметр – поле допуска» в интересах моделирования проактивного обслуживания устройств и систем телекоммуникаций, а также введения предотказного вида состояния, характеризующего повышенным риском его отказа.

Модель можно представить геометрически, как показано в общем виде на рис. 1.

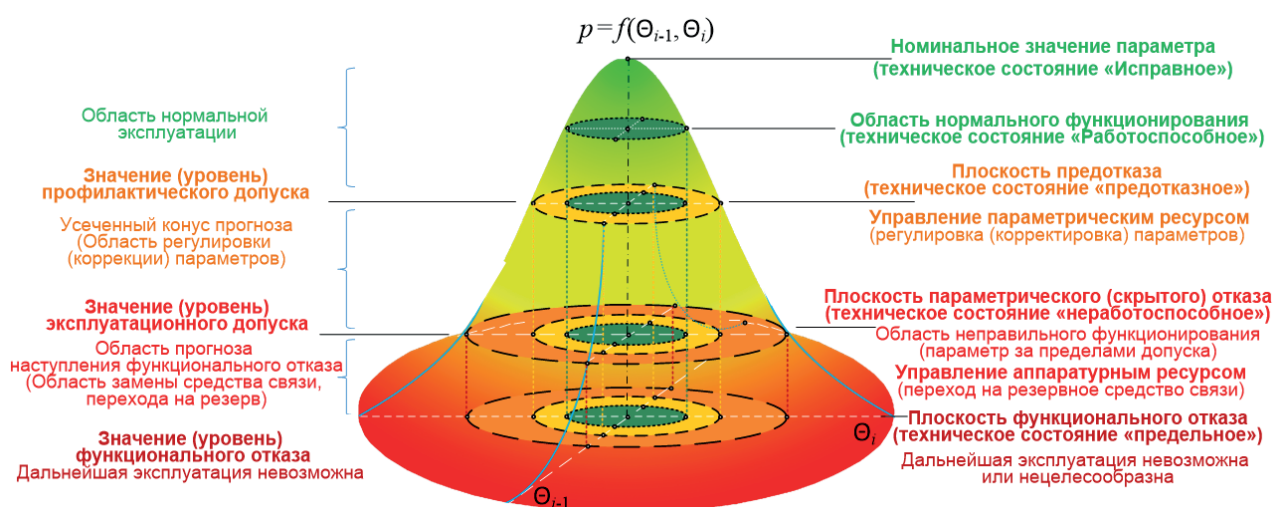


Рис. 1. Геометрическая интерпретация частной кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска»

Такое геометрическое представление рассматриваемой модели несколько идеализировано, поскольку во-первых, выбор параметров и расчет его эксплуатационных допусков строго индивидуален в процессе моделирования, а во-вторых, в сечении плоскости допустимого значения $p_{\text{доп}}$ комплексного показателя качества с областью (телом) неопределенности $p = f(\Theta_{i-1}, \Theta_i)$, строго говоря, в виде эллипса качества не всегда будет наблюдаться правильный эллипс (для двухпараметрического пространства), в том числе и в силу несимметричности допусков «+Δ» и «-Δ» на параметры (рис. 2) или из-за развития внезапных отказов в отношении одного или более коррелированных параметров, требующих приоритетности по времени обслуживания для недопущения аварии.

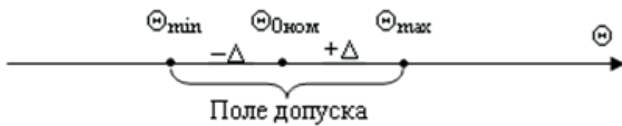


Рис. 2. Геометрическое представление параметра и поля допуска на него

Номинальное значение контролируемого параметра находится в вершине, при его незначительных отклонениях как в одну, так и в другую сторону остается в области нормального функционирования, при значительных отклонениях от номинального значения попадает в область предотказа, далее область параметрического скрытого отказа и область функционального отказа.

При пересечении первых двух – функционального отказа может не произойти, наступит только параметрический, но, если вовремя не обратить на это внимание, значение параметра в связи с неправильным функционированием деградирует, упадет в самую нижнюю плоскость «предельного» состояния, когда дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, нарушится связность всей сети, она заблокируется, снизится боевая готовность, что недопустимо.

Описание области полного отказа путем назначения эксплуатационных допусков известно, нас интересует назначение профилактических допусков, что крайне важно для внедрения стратегии управления надежностью на основе прогнозирования вида технического состояния, индивидуального и превентивного характера упреждения отказов. Геометрическая интерпретация назначения допусков для кумулятивной модели отказа с учетом наличия для каждого

из рассматриваемых допусков ошибок контроля первого и второго рода представлена на рис. 3.

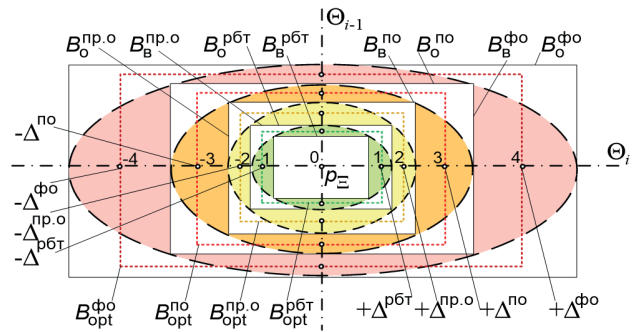


Рис. 3. Кумуляция профилактических и эксплуатационных допусков на параметры объекта контроля

Для двухпараметрического пространства параметров ($m = 2$) моделирование допусков на параметры можно осуществить с использованием ошибок контроля первого рода α через описанные вокруг эллипсов качества прямоугольники, характеризующие технические состояния объекта контроля «работоспособное» — $B_{o}^{рбт}$, «предотказное» — $B_{o}^{пр.о}$, «параметрический отказ» — $B_{o}^{по}$ и «функциональный отказ» — $B_{o}^{фо}$, а также ошибок контроля второго рода β через вписанные в эллипсы качества прямоугольники, характеризующие эти состояния и отказы $B_{в}^{рбт}$, $B_{в}^{пр.о}$, $B_{в}^{по}$, $B_{в}^{фо}$.

Частная вероятностно-графовая модель идентификации и прогнозирования отказа

Функционирование объекта контроля на основе многоуровневого принципа построения характеризуется огромным числом параметров, контролируемых (наблюдаемых) с разных контуров управления (серверов мониторинга), поэтому и саму процедуру мониторинга технического состояния объекта контроля необходимо проводить поэтапно [7, 8], в связи с чем предлагается вторая частная модель – вероятностно-графовая модель идентификации и прогнозирования отказа, состоящая из этапа обнаружения предотказа, этапа распознавания параметрического отказа и этапа прогнозирования функционального отказа.

Графовые модели достаточно широко применяются в Байесовской статистике, в теории вероятностей, а также в машинном обучении [9].

На рис. 4 представлены зависимости между случайными величинами, характеризующими состояние объекта контроля, в виде графа, при этом вершины графа соответствуют видам технического состояния, а его ребра представляют

вероятностную взаимосвязь случайных величин. На рисунке показаны: $P_1 = 1 - P_2$ — априорные

вероятности отсутствия аномальной ситуации и P_2 — ее наличие.

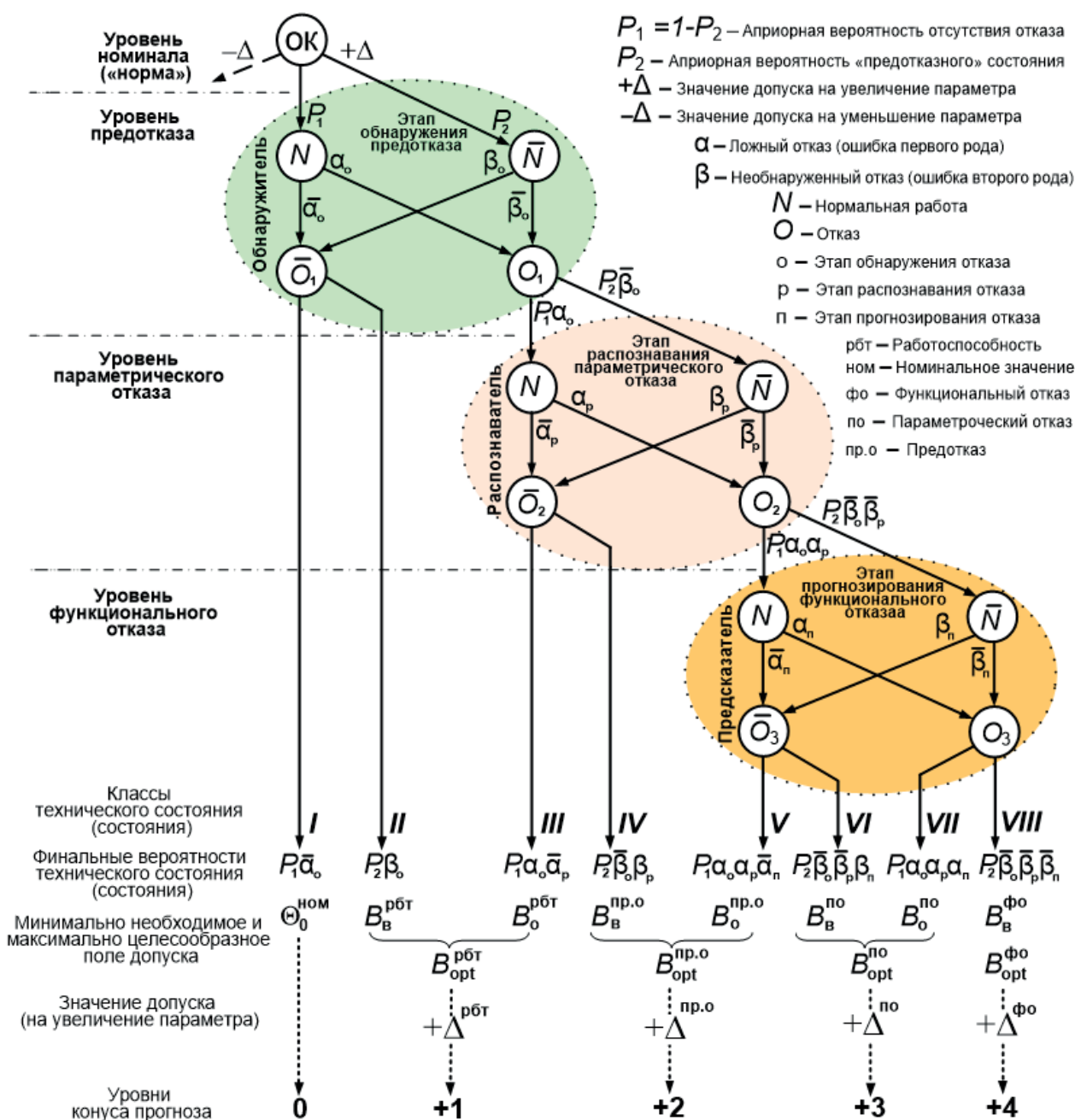


Рис. 4. Вероятностно-графовая модель идентификации и прогнозирования отказа

В предложенной модели идентификации можно выделить финальные значения вероятностей их нахождения в каком-либо техническом состоянии [10], используемом для определения этого класса:

- класс «I» — система работоспособна, признана работоспособной;
- класс «II» — система заблокирована, отказ не обнаружен, предотказ не обнаружен;
- класс «III» — система работоспособна, признана работоспособной;
- класс «IV» — система заблокирована, отказ не распознан, параметрический отказ не распознан;

- класс «V» — прогноз состояния «работоспособное», ложный отказ не распознан;
- класс «VI» — прогноз состояния «неработоспособное», отказ обнаружен и не распознан;
- класс «VII» — состояние «работоспособное», ложный прогноз отказа;
- класс «VIII» — прогноз состояния «неработоспособное», отказ обнаружен и распознан.

Классы состояний «V–VIII», показанные на рис. 4 можно отнести к завершающему ее этапу работы – прогнозированию, в то время как классы «I–IV» относятся к обнаружению и распознаванию «предотказного» и «неработоспособного» состояния.

Последствия для объекта контроля:

- класс «I» – эксплуатация;
- класс «II» – снижение боевой готовности;
- класс «III» – профилактика;
- класс «IV» – снижение боевой готовности;
- класс «V» – ложный резерв;
- класс «VI» – резерв;
- класс «VII» – ложный резерв;
- класс «VIII» – резерв.

В соответствии с вероятностно-графовой моделью идентификации и прогнозирования отказа математически виды технических состояний можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}\langle I \rangle &= P_1 \bar{\alpha}_o; \\ \langle II \rangle &= P_2 \bar{\beta}_o; \\ \langle III \rangle &= P_1 \alpha_o \bar{\alpha}_p; \\ \langle IV \rangle &= P_2 \bar{\beta}_o \bar{\beta}_p; \\ \langle V \rangle &= P_1 \alpha_o \alpha_p \bar{\alpha}_n; \\ \langle VI \rangle &= P_2 \bar{\beta}_o \bar{\beta}_p \bar{\beta}_n; \\ \langle VII \rangle &= P_1 \alpha_o \alpha_p \alpha_n; \\ \langle VIII \rangle &= P_2 \bar{\beta}_o \bar{\beta}_p \bar{\beta}_n.\end{aligned}$$

В общем виде вариационный ряд предпочтений видов состояния с учетом достоверности прогноза математически можно выразить как:

$$\langle I \rangle > \langle VIII \rangle > \langle V \rangle > \langle VII \rangle > \langle III \rangle > \langle VI \rangle > \langle IV \rangle > \langle II \rangle$$

Исходя из представленной модели, аналитические выражения для определения вероятности идентификации подсистемой мониторинга «работоспособного» состояния ($P_{\text{рбтс}}$) и, соответственно, вероятности идентификации ею «неработоспособного» состояния (отказа) $P_{\text{отк}}$ будут иметь вид:

$$P_{\text{рбтс}} = 1 - \left[\bar{\beta}_n \left\{ 1 - \left(1 - P_1^o \alpha_o \bar{\beta}_p \right) \left(1 - P_1^p \alpha_p \right) \right\} \right] \left[1 - P_1^n \alpha_n \right],$$

$$P_{\text{отк}} = 1 - \bar{\beta}_n \left[1 - \bar{\beta}_p \left\{ 1 - \left(1 - P_2^o \alpha_o \bar{\beta}_o \right) \left(1 - P_2^p \right) \right\} \right] \left[1 - P_2^p \right].$$

Таким образом, модель позволяет получать аналитические зависимости для нахождения вероятности каждого вида технического состояния объекта контроля, характеризующих предотказ, параметрический отказ, функциональный отказ, а также финальные вероятности для состояний «работоспособное», «предотказное» и «неработоспособное» не только с использованием ошибок контроля (ошибки обнаружения и ошибки распознавания отказов), но и ошибок прогноза первого и второго рода.

Заключение

Общая модель превентивной идентификации отказов объекта контроля, состоящая из двух частных: кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска» и вероятностно-графовой модели идентификации и прогнозирования отказа в отличии от существующих ранее учитывает не только области нормального функционирования и полного отказа, но и области предотказа и параметрического (скрытого отказа), что позволяет не допустить внезапного отказа, соответственно, не допустить простоя, обосновать пороги эксплуатационных и профилактических допусков.

Теоретически обоснован переход к стратегии прогнозного технического обслуживания в процессе управления надежностью объектов контроля; математически обоснован вид технического состояния «предотказное» через расчет профилактических допусков (на уровне $\approx 0,8$ от значения эксплуатационных допусков); осуществлено дальнейшее развитие элементов теории надежности через получение аналитических зависимостей для нахождения вероятности каждого вида технического состояния объекта контроля, характеризующих предотказ, параметрический отказ, функциональный отказ, а также финальные вероятности для состояний «работоспособное», «предотказное» и «неработоспособное» не только с использованием ошибок контроля (ошибки обнаружения и ошибки распознавания отказов), но и ошибок прогноза первого и второго рода.

Предложенные частные модели должны лечь в основу создания подсистемы мониторинга нового поколения (на основе прогнозного контроля) для разрабатываемых в настоящее время изделий.

Литература

1. Абрамов О. В. Прогнозирование состояния и планирование эксплуатации систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3 (31). С. 5–14.
2. Будко Н. П. Сокращение объема измерительной информации на основе интеллектуального подхода к построению системы мониторинга информационно-телекоммуникационной системы // Техника средств связи. 2021. № 1 (153). С. 86–97.
3. Аллакин В. В., Голунов М. В. Анализ научно-методического аппарата удаленного мониторинга технического состояния информационно-телекоммуникационных сетей и систем // Техника средств связи. 2020. № 4 (152). С. 17–37.
4. Абрамов О. В., Назаров Д. А. Методы и средства интеллектуальной поддержки прогноза технического состояния систем ответственного назначения // Информатика и системы управления. 2022. № 4 (74). С. 54–63.
5. Боговик А. В., Сафиулов Д. М., Шмидт А. А. Математические модели процесса мониторинга технического состояния радиосредств специального назначения // Техника средств связи. 2024. № 3 (167). С. 31–41.
6. Будко П. А., Груздев А. А., Шаталов А. Е., Шмидт А. А. Модель формирования системы интеллектуального мониторинга состояния информационно-телекоммуникационной сети Росморречфлота // Морская радиоэлектроника. 2024. № 2 (88). С. 20–27.
7. Аллакин В. В., Будко Н. П., Васильев Н. В. Общий подход к построению перспективных систем мониторинга распределенных информационно-телекоммуникационных сетей // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 125–227.
8. Аллакин В. В., Будко Н.П. Идентификация состояния узлов информационно-телекоммуникационных сетей общего пользования подсистемой мониторинга информационной безопасности // Техника средств связи. 2020. № 3 (151). С. 58–64.
9. Аллакин В. В. Модель идентификации технического состояния устройств информационно-телекоммуникационных сетей подсистемой сетевого мониторинга // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 5. С. 40–64.
10. Аллакин В. В. Анализ методов оценки временных рядов сервером мониторинга информационно-телекоммуникационной сети общего пользования // Техника средств связи. 2021. № 2 (154). С. 60–80.

PARTICULAR MODELS OF PREVENTIVE FAILURE IDENTIFICATION: CUMULATIVE AND PROBABILISTIC-GRAPH

Budko P.A.¹, Yuzhakova A.A.²

Keywords: *cumulation, forecasting, identification, maintenance, reliability, object of control, operational tolerance, preventive tolerance, preventive failure, technical condition.*

The purpose of the work is to develop a general model of preventive failure identification for a justified transition to more advanced integrated maintenance and repair strategies focused on reliability: condition-based maintenance, predictive maintenance.

Method: *system analysis, graph theory, mathematical modeling.*

Results of the study: *a general model of preventive identification of failures of the object of control is proposed, consisting of two particulars: a cumulative failure model of the "parameter – tolerance field" type and a probabilistic-graph model of failure identification and prediction.*

The first partial model makes it possible to calculate preventive tolerances for the monitored parameters, taking into account control errors of the first and second types in the interests of prognostic maintenance, the second - to obtain analytical dependencies to find the probability of each type of technical condition of the object of control and final probabilities for states taking into account forecasting errors of the first and second types.

The developed particular models of preventive failure identification are a cumulative failure model of the "parameter – tolerance field" type and a probabilistic-graph model of failure identification and prediction for solving the problems of predicting the technical condition of the tested object.

Scientific novelty: *the individual models in the aggregate, in contrast to the existing ones, take into account not only the areas of normal functioning and complete failure, but also the areas of pre-failure and parametric (latent failure), which makes it possible to prevent a sudden failure, respectively, to prevent downtime, to substantiate the thresholds of operational and preventive tolerances.*

¹Pavel A. Budko, Dr.Sc. (of Technical), Professor, Professor of the Department of Technical Support of Communications and Automation of the Military Academy of Communications, Scientific Secretary of Inteltech PJSC, St. Petersburg, Russia. E-mail: budko62@mail.ru

²Anna A. Yuzhakova, Adjunct of the Department of Technical Support of Communications and Automation, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: anutikaaa@mail.ru

References

1. Abramov O. V. Prognozirovanie sostojanija i planirovanie jekspluatacii sistem otvetstvennogo naznachenija // Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem. 2020. № 3 (31). S. 5–14.
2. Budko N. P. Sokrashhenie ob#ema izmeritel'noj informacii na osnove intellektual'nogo podhoda k postroeniju sistemy monitoringa informacionno-telekommunikacionnoj sistemy // Tehnika sredstv svjazi. 2021. № 1 (153). C. 86–97.
3. Allakin V. V., Golyunov M. V. Analiz nauchno-metodicheskogo apparata udalennogo monitoringa texnicheskogo sostoyaniya informacionno-telekommunikacionny`x setej i sistem // Tehnika sredstv svjazi. 2020. № 4 (152). C. 17-37.
4. Abramov O. V., Nazarov D. A. Metody i sredstva intellektual'noj podderzhki prognoza tehniceskogo sostojanija sistem otvetstvennogo naznachenija // Informatika i sistemy upravlenija. 2022. № 4 (74). S. 54–63.
5. Bogovik A. V., Safiulov D. M., Shmidt A. A. Matematicheskie modeli processa monitoringa tehniceskogo sostojanija radiosredstv special'nogo naznachenija // Tehnika sredstv svjazi. 2024. № 3 (167). C. 31–41.
6. Budko P. A., Gruzdev A. A., Shatalov A. E., Shmidt A. A. Model' formirovanija sistemy intellektual'nogo monitoringa sostojanija informacionno-telekommunikacionnoj seti Rosmorrechflota // Morskaja radiojelektronika. 2024. № 2 (88). S. 20–27.
7. Allakin V. V., Budko N. P., Vasil'ev N. V. Obshhij podhod k postroeniju perspektivnyh sistem monitoringa raspredelennyh informacionno-telekommunikacionnyh setej // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2021. № 4. S. 125–227.
8. Allakin V. V., Budko N.P. Identifikaciya sostoyaniya uzlov informacionno-telekommunikacionny`x setej obshhego pol' zovaniya podsistemoj monitoringa informacionnoj bezopasnosti // Tehnika sredstv svjazi. 2020. № 3 (151). C. 58-64.
9. Allakin V. V. Model' identifikacii tehniceskogo sostojanija ustrojstv informacionno-telekommunikacionnyh setej podsistemoj setevogo monitoringa // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2021. № 5. C. 40–64.
10. Allakin V. V. Analiz metodov ocenki vremenny`x ryadov serverom monitoringa informacionno-telekommunikacionnoj seti obshhego pol' zovaniya // Tehnika sredstv svjazi. 2021. № 2 (154). C. 60-80.

