

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 519.873

doi:10.21685/2307-4205-2021-4-1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОНАДЕЖНОЙ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Н. К. Юрков

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Предлагается подход к развитию фундаментальных основ конструкторско-технологического проектирования радиоэлектронных средств, функционирующих в жестких условиях эксплуатации. Решение проблемы ведется с учетом многофакторности взаимного влияния внешних воздействующих факторов. Подчеркнута острая необходимость единой теоретической базы создания адаптивных самовосстанавливающихся реконфигурируемых структур радиоэлектронных систем (РЭС), что позволяет значительно снизить затраты на резервирование, повысить адаптивные способности аппаратуры, а также оптимизировать массо-габаритные характеристики систем. Автоматический выбор цели (это должна быть как локальная, так и частная цели) может быть реализован при условии оценки степени приближения системы к ее глобальной цели, которая должна быть представлена не декларативно, а как известная совокупность условий, т.е. глобальная цель должна быть декомпозирована на множество подцелей (локальных, частных, временных, переходных и т.д.), а это возможно только на основе искусственного интеллекта, способного находить обоснованные с точки зрения разума и интуиции человека решения. *Материалы и методы.* Формирование стратегий квазиоптимального управления интеллектуального резервирования радиоэлектронных систем проводится на основе методологии структурно-параметрической оптимизации РЭС. Математически это представляет собой решение обратной задачи теории надежности с последующим выявлением не критичных по внешним воздействующим факторам компонентов, на основе чего проводится структурно-параметрический синтез РЭС с учетом обобщения опыта эксплуатации, получаемого с помощью интеллектуальных компьютерных систем обучения. *Результаты и выводы.* Предлагаемый подход к синтезу системы управления строится на основе динамической экспертной системы, представляющей собой банк знаний, алгоритмов, сформированных на основе опроса экспертов, и обладающей высокоуровневым интерфейсом.

Ключевые слова: надежность, конструкторско-технологическое проектирование, радиоэлектронное средство, адаптация, квазиоптимальное управление

Для цитирования: Юрков Н. К. Современное состояние исследований в области создания высоконадежной бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 5–12. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-1

THE CURRENT STATE OF RESEARCH IN THE FIELD OF CREATING HIGHLY RELIABLE ON-BOARD ELECTRONIC EQUIPMENT

N.K. Yurkov

Penza State University, Penza, Russia
yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* An approach to the development of the fundamental foundations of the design and technological design of radio-electronic devices operating in harsh operating conditions is proposed. The solution to the problem is carried out taking into account the multifactorial nature of the mutual influence of external influencing factors. The urgent need for a unified theoretical basis for creating adaptive self-healing reconfigurable structures of radio-electronic systems (RES) is emphasized, which can significantly reduce the cost of redundancy, increase the adaptive capabilities of equipment, and also optimize the mass-dimensional characteristics of systems. Automatic target selection (this should be both local and private goals) can be implemented provided that the degree of approximation of the system to its global goal is assessed, which should be presented not declaratively, but as a known set of conditions, i.e. a global goal should be decomposed into many subgoals (local, private, temporary, transitional, etc.), and this is possible only on the basis of artificial intelligence capable of finding solutions that are justified from the point of view of human reason and intuition. *Materials and methods.* The formation of strategies for quasi-optimal control of intelligent redundancy of radio-electronic systems is carried out on the basis of the methodology of structural-parametric optimization of radio electronic systems. Mathematically, this is a solution to the inverse problem of the theory of reliability with the subsequent identification of components that are not critical in terms of external influencing factors, on the basis of which a structural-parametric synthesis of RES is carried out, taking into account the generalization of the operating experience obtained with the help of intelligent computer training systems. *Results and conclusions.* The proposed approach to the synthesis of a control system is based on a dynamic expert system, which is a knowledge bank, algorithms formed on the basis of a survey of experts, and has a high-level interface.

Keywords: reliability, design and technological design, electronic means, adaptation, quasi-optimal control

For citation: Yurkov N.K. The current state of research in the field of creating highly reliable on-board electronic equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-1

Большинство современных работ посвящены решению классических задач конструкторско-технологического проектирования с целью создания конструкции с ограниченной эксплуатационной зоной, а также решению задач адаптации существующих конструкций к новым условиям эксплуатации. Проблема синтеза самоорганизующихся реконфигурируемых структур радиоэлектронных систем на основе интеллектуального резервирования не звучит в явной форме, хотя ее актуальность несомненна. Актуальность методологии синтеза супернадёжных систем длительного функционирования подтверждается все возрастающими требованиями к надёжности и качеству бортовой радиоэлектронной аппаратуры с высокими требованиями по массогабаритным ограничениям, работающей в жестких условиях эксплуатации [1, 2].

Сложная РЭС представляет собой мультиагентную структуру, для которой актуальна разработка и совершенствование методологии мультиагентного взаимодействия модулей, получаемых в результате разукрупнения системы РЭС, и объединенных по функциональному признаку. Функционирование РЭС опирается на общесистемную целевую функцию, которая постоянно «уточняется» в соответствии со своим текущим состоянием (локальными целевыми функциями) и динамикой воздействующих факторов внешней среды.

В условиях возрастающих требований к надёжности радиоэлектронных средств крайне остро ощущается необходимость в единой теоретической базе создания адаптивных самовосстанавливающихся реконфигурируемых структур радиоэлектронных систем. Важнейшее значение имеет совершенствование научно-методических основ повышения долговечности и безотказности деталей и узлов, что подразумевает обязательные мероприятия по многоэшелонному резервированию, что в свою очередь ведет к непроизводительным материальным затратам и значительному снижению массогабаритных показателей; обоснование межремонтных периодов, нормативов расхода сменно-запасных частей и объема ремонтов, актуальны научно обоснованные требования по надёжности применительно к заданным условиям эксплуатации и многие другие задачи. Хотя на этапе проектирования и закладываются основы надёжного функционирования изделия, нельзя исключать меро-

приятия по повышению надежности и долговечности также в ходе эксплуатации РЭС. Актуальной является проблема разработки и совершенствования методологии структурно-параметрической оптимизации проектных решений высоконадежных радиоэлектронных средств с учетом прогнозирования и управления показателями эффективности на этапе эксплуатации. И здесь не удается обойтись без резервирования элементов, блоков, подсистем. При этом необходимо именно интеллектуальное резервирование, основанное на накоплении и обработке знаний и позволяющее создавать конкретные резервные элементы по мере возникающей необходимости в ходе эксплуатации, а не складировать их заранее. Все это осуществляется на основе систем активной безопасности и локализации неисправностей, прогнозирования развития латентных дефектов, интеллектуальных компьютерных систем проектирования и теории распознавания образов. При этом появляется возможность использовать минимальные по массе и габаритам резервные блоки, которые по мере необходимости приобретают способность выполнять структурное и функциональное резервирование тех подсистем, которые имеют наибольшую (с точки зрения живучести системы) степень деградации [3, 4].

Научная значимость проблемы состоит в развитии фундаментальных основ конструкторско-технологического проектирования радиоэлектронных средств для жестких условий эксплуатации. Масштаб решаемой проблемы определяется многофакторностью взаимного влияния внешних воздействующих факторов, таких как температурные, механические и электромагнитные воздействия применительно к индивидуальной конструкции самовосстанавливающейся радиоэлектронной системы [5].

В процессе синтеза сложных, многопараметрических, высоконадежных РЭС ответственного применения требуется построение и управление областью работоспособности, а также необходимо выявить методологические аспекты синтеза критериев структурно-параметрической оптимизации. Решение оптимизационных задач для высоконадежных систем, в которых показатели надежности выступают в роли целевых функций, представляет собой сложную научно-техническую проблему, описываемую системой нелинейных дифференциальных уравнений большого порядка. Принимая некоторые допущения относительно ее области применения, удастся использовать упрощенный математический аппарат оценки надежности, что существенно снижает ранг решения проблемы.

При этом требуется разработка фундаментальных физико-математических основ синтеза структуры высоконадежных электронных средств на основе интеллектуального резервирования путем создания системы активной безопасности, включающей в себя подсистемы диагностики и внутренней реконфигурируемости для определения и управления областью работоспособности при учете внешних воздействующих факторов. Необходимо создание методологических основ комплексного учета факторов снижения ресурса электронных систем под действием внешних факторов [6].

Таким образом, актуальность синтеза адаптивных самовосстанавливающихся систем (Adaptive Self-Recovering System – ASRS), обеспечивающих бесперебойную работу систем ответственного назначения при длительной эксплуатации в жестких условиях, на основе интеллектуального резервирования не вызывает сомнения.

Таким образом, актуальна научная проблема формирования стратегий квазиоптимального управления интеллектуального резервирования радиоэлектронных систем на основе структурно-параметрической оптимизации бортовых РЭС ответственного назначения в зависимости от начальных, текущих и пролонгированных состояний системы. Создание алгоритмов структурно-параметрического синтеза резервирующих элементов, интеллектуального управления резервированием, созданием и восстановлением коммутирующих связей, обеспечивающих живучесть РЭС в реальных условиях эксплуатации осуществляется с учетом накопившейся усталости элементов и самой конструкции РЭС.

Необходима система активной безопасности, позволяющая обеспечить контроль за состоянием элементов и всей системы в целом, прогнозирование развития латентных дефектов на основе моделирования их развития с учетом влияния внешних воздействующих факторов (ВВФ) и воздействия старения, усталостной прочности материалов за счет интеллектуального резервирования, с последующим восстановлением нарушенных связей (элементов, компонент).

Математически это представляет собой решение обратной задачи теории надежности с последующим выявлением некритичных по внешним воздействующим факторам компонент, на основе чего проводится структурно-параметрический синтез РЭС с учетом обобщения опыта эксплуатации, получаемого с помощью интеллектуальных компьютерных систем обучения [7].

Актуальна разработка фундаментальных подходов, позволяющих синтезировать квазиоптимальную структуру высоконадежных электронных средств с возможностью последующей адаптации полученной структуры под выполнение поставленной задачи при выходе из строя части узлов и блоков разработанной системы, и тем самым создать методологию структурно-параметрического синтеза подсистем интеллектуального резервирования [8].

В ходе исследования предполагается решение следующих задач:

- применение системного учета комплексного влияния внешних воздействующих факторов на узлы электронной аппаратуры, отличающегося созданием мультиагентной цифровой модели, ориентированной на динамическую индивидуальную оценку показателей надежности;
- разработка методики комплексного учета в цифровой модели электронного блока как вибрационного воздействия, так и воздействий температуры, а также электромагнитного поля;
- разработка методов автоматизированного интеллектуального выбора минимально необходимого набора индикаторных показателей электронной аппаратуры, предназначенного для мониторинга и оценки показателей надежности с требуемым уровнем достоверности;
- разработка интеллектуальной компьютерной обучающей системы распознавания, оценки и прогнозирования степени влияния накопления усталостных явлений на развитие латентных дефектов;
- разработка методики, программной и аппаратной реализации для динамической оценки и прогнозирования работоспособности электронной аппаратуры на основе индикаторных показателей;
- разработка методики оценки показателей надежности проектируемых узлов, в том числе мелкосерийного и единичного исполнения, на основе выбранных индикаторных показателей, ориентированных на интеграцию в цифровые модели современной аппаратуры и отличающихся возможностью динамического контроля и прогнозирования предотказных состояний;
- разработка методов, моделей и алгоритмов прогнозирования остаточного ресурса узлов при динамическом контроле индикаторных показателей электронной аппаратуры в процессе эксплуатации;
- разработка методологических основ процесса реконфигурации сложных электронных систем за счет интеллектуального резервирования отдельных элементов и подсистем;
- разработка фундаментальных основ формирования резервных компонент по мере возникновения необходимости в их замене, а также восстановление нарушенных функциональных связей.

Системное представление указанного подхода графически дано на рис. 1 [9].



Рис. 1. Структура системы синтеза адаптивных самовосстанавливающихся РЭС на основе интеллектуального резервирования

Проблема заключается в определении алгоритмов структурно-параметрического синтеза системы управления интеллектуальным резервированием РЭС, находящейся под воздействием случайных факторов, когда на основе первичного определения положения динамической системы в фазовом пространстве и интеллектуальной оценки результатов прогнозирования состояния системы в реальном времени определяются алгоритмы формирования резервных элементов (подсистем) и алгоритмы их коммутации. Далее предстоит выявить конфликтные ситуации; определить параметры квазиоптимального управления в реальном пространстве и времени; распределить функции управления между человеком и техническими устройствами и осуществить синтезированное управление [10].

Это позволяет повысить эффективность принимаемых решений на основе обеспечения точности и устойчивости решения обратной задачи математической теории управления [11].

В связи с вышесказанным необходимо:

- 1) совершенствовать методологию структурно-параметрической оптимизации высоконадежных конструкций РЭС на начальных этапах жизненного цикла;
- 2) разработать методы проектирования резервирующих компонентов РЭС;
- 3) создать методики построения динамической системы с переменным числом параметров (адаптивная система), находящейся под воздействием деструктивных факторов;
- 4) разработать методику комплексного прогнозирования развития дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры для интеллектуальной системы поддержки принятия решений;
- 5) разработать систему самодиагностики, ориентированной на применение как на верхнем системном уровне, так и на уровне электронных блоков;
- 6) осуществить выбор оптимальной совокупности контролируемых параметров изделий РЭС для оценки работоспособности узлов, их резерва и возможности дальнейшего выполнения оптимизационной задачи;
- 7) создать методику построения области работоспособности и управления ею, оценки запаса работоспособности для многопараметрических РЭС; разработать методологические аспекты синтеза критерия оптимальности на базе построения как глобальной, так и локальных целевых функций системы;
- 8) разработать методику оценки комплексного влияния температуры и механических и электромагнитных воздействий на работоспособность блока на этапе проектирования и эксплуатации, а также учет технологических особенностей производства;
- 9) провести исследование оптимизационных параметров конструкций РЭС с учетом многофакторной нелинейности гетероструктур, с учетом электромагнитных воздействий в процессе эксплуатации;
- 10) сформировать методологию оценки надежности электронной аппаратуры при комплексных воздействиях.

Таким образом, необходимо построить систему, которая могла бы скоординировать работу всех систем управления, задействованных в функциональной структуре РЭС, т.е. достичь такой эффективности с позиций аппаратуры длительного функционирования, в которой в ходе эксплуатации возможны изменения (деградация) штатного поведения подсистем и систем в целом, вызванные неисправностями или внешними возмущающими факторами, имеющими как объективный, так и субъективный характер. Эта система позволяет осуществлять оперативное формирование взаимосвязанных процедур мониторинга и управления состоянием РЭС, при котором обнаружение, локализация и ликвидация сбоев и отказов в них будет происходить раньше, чем станут проявляться возможные отрицательные последствия неисправностей [12].

Структура адаптивной самовосстанавливающейся системы представлена на рис. 2 [13].

Анализ рис. 2 показывает, что система функционирует на основе локальной цели (которая в свою очередь формируется из глобальной цели) с учетом внешних воздействующих факторов, которые в системе представлены своими моделями. Человек как лицо, принимающее решение (ЛПР), вырабатывает управляющее воздействие и представляет модели подсистем согласно локальным целям системы. Управляющие воздействия от ЛПР поступают в подсистему рассогласования между структурой и параметрами подсистем и соответствующих локальных целей. Получаемая информация о рассогласовании поступает в блок синтеза (материализации) структуры и параметров подсистемы, отвечающей за реализацию данной локальной цели. Также формируются частные цели, которые реализуются за счет управляющих воздействий в блоке достижения локальной цели.



Рис. 2. Структура адаптивной самовосстанавливающейся системы

Таким образом, необходимо создать систему управления, которая не обрабатывает, а вырабатывает цель автоматически внутри себя. А поскольку система управления по определению предназначена для достижения уже выбранной цели, новая система, вырабатывая цель, превышает функции, возлагаемые на систему управления, являясь еще и системой автоматического целеуказания.

Автоматический выбор цели (это должна быть как локальная, так и частная цель) может быть реализован при условии оценки степени приближения системы к ее глобальной цели, которая должна быть представлена не декларативно, а как известная совокупность условий, т.е. глобальная цель должна быть декомпозирована на множество подцелей (локальных, частных, временных, переходных и т.д.), а это возможно только на основе искусственного интеллекта, способного находить обоснованные с точки зрения разума и интуиции человека решения. При этом система управления строится на основе динамической экспертной системы, представляющей собой банк знаний, алгоритмов, сформированных на основе опроса экспертов, и обладающей высокоуровневым интерфейсом.

Список литературы

1. Каштанов В. А., Медведев А. И. Теория надежности сложных систем. 2-е изд., перераб. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. 608 с.
2. Северцев Н. А. Теория надежности сложных систем в отработке и эксплуатации : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Юрайт, 2019. 435 с.
3. Острейковский В. А. Теория надежности : учеб. для вузов. М. : Высш. шк., 2003. 463 с.
4. Абрамов О. В., Розенбаум А. Н. Управление эксплуатацией систем ответственного назначения. Владивосток : Дальнаука, 2000. 200 с.
5. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Недорезов В. Г., Юрков Н. К. Концептуальные основы обоснования применения операторов эволюции микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 17–30.
6. Михайлов В. С., Юрков Н. К. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты. М., 2020. 149 с.
7. Юрков Н. К. Интеллектуальные компьютерные обучающие системы : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. 304 с.
8. Yurkov N. K., Mikhaylov V. S. Estimates of reliability indicators for failure-free tests conducted according to the binomial plan // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 : proceedings. 2020. С. 9067421.
9. Юрков Н. К., Кочегаров И. И., Трусов В. А. Разработка единой надежно-ориентированной модели радиоэлектронных средств // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 19–21.
10. Северцев Н. А., Юрков Н. К., Гришко А. К. К проблеме глобальной оптимизации параметров надежности и безопасности сложных динамических систем инверсным методом // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 13–23.

11. Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Абдирашев О. К. [и др.]. Методика оценки остаточного ресурса электронного блока с использованием ускоряющих факторов // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 58–72.
12. Grishko A., Lysenko A., Yurkov N. Stochastic model of parametric prediction of reliability of radio-electronic systems // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2019 : proceedings. 2019. С. 432–435.
13. Юрков Н. К. Методология программно-целевого адаптивного управления интегрированными производственными комплексами в условиях неопределенности // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 107–110.

References

1. Kashtanov V.A., Medvedev A.I. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh system = Theory of reliability of complex systems*. 2nd ed., rev. Moscow: FIZMATLIT, 2010:608. (In Russ.)
2. Severtsev N.A. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem v otrabotke i ekspluatatsii: ucheb. posobie = Theory of reliability of complex systems in development and operation : textbook*. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Yurayt, 2019:435. (In Russ.)
3. Ostreykovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti: ucheb. dlya vuzov = Reliability theory : textbook for universities*. Moscow: Vyssh. shk., 2003:463. (In Russ.)
4. Abramov O.V., Rozenbaum A.N. *Upravlenie ekspluatatsiyey sistem otvetstvennogo naznacheniya = Management of the operation of systems of responsible purpose*. Vladivostok: Dal'nauka, 2000:200. (In Russ.)
5. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Nedorezov V.G., Yurkov N.K. Conceptual bases of substantiation of application of operators of evolution of microscopic entropy, transformation and internal time in the theory of durability of structurally and functionally complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2021;(1):17–30. (In Russ.)
6. Mikhaylov V.S., Yurkov N.K. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. Vvedenie i osnovnye rezul'taty = Integral estimates in reliability theory. Introduction and main results*. Moscow, 2020:149. (In Russ.)
7. Yurkov N.K. *Intellectual'nye komp'yuternye obuchayushchie sistemy: monografiya = Intelligent computer learning systems : monograph*. Penza: IZD-VO PGU, 2010:304. (In Russ.)
8. Yurkov N.K., Mikhaylov V.S. Estimates of reliability indicators for failure-free tests conducted according to the binomial plan. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020: proceedings*. 2020:9067421.
9. Yurkov N.K., Kochegarov I.I., Trusov V.A. Development of a unified reliability-oriented model of electronic means. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:19–21. (In Russ.)
10. Severtsev N.A., Yurkov N.K., Grishko A.K. On the problem of global optimization of reliability and safety parameters of complex dynamic systems by the inverse method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2020;(1):13–23. (In Russ.)
11. Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Abdirashev O.K. [et al.]. Methodology for estimating the residual life of an electronic unit using accelerating factors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2020;(4):58–72. (In Russ.)
12. Grishko A., Lysenko A., Yurkov N. Stochastic model of parametric prediction of reliability of radio-electronic systems. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2019: proceedings*. 2019:432–435.
13. Yurkov N.K. Methodology of program-targeted adaptive management of integrated production complexes in conditions of uncertainty. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:107–110. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 27.09. 2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.10.2021

Принята к публикации/Accepted 10.11.2021