

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗА

И.В. Бармин^{1,2}

barmin@bmstu.ru

В.А. Лоховин¹

v.lohovin@russian.space

¹ АО «ЦЭНКИ», Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Синхронность функционирования многочисленных технологических систем, участвующих в подготовке и запуске ракет космического назначения, является основным требованием, предъявляемым к наземным комплексам космодромов. Практически все позиции на современном космодроме (стартовые и технические комплексы, измерительные пункты, астрономо-геодезические и метеорологические комплексы и др.) оснащены системами единого времени в целях синхронизации технологических систем, расположенных на объектах. При проектировании систем единого времени особое внимание уделяется обеспечению заданных показателей надежности, устранению структурной избыточности и снижению стоимости. Используемые в настоящее время методы расчета не учитывают функциональное взаимодействие между компонентами современных систем единого времени и требуют уточнения. Уточнение должно коснуться ранжирования отдельных функциональных групп системы по степени критичности. Рассмотрена возможность применения функционального анализа для оценки показателей надежности систем единого времени наземной космической инфраструктуры. Предложен алгоритм, позволяющий проводить декомпозицию системы. Уточненный метод послужит основой пошагового руководства для каждого этапа разработки системы единого времени, что может улуч-

Ключевые слова

Система единого времени, функциональный анализ, показатели надежности, наземная космическая инфраструктура, жизненный цикл

шить качество оценки показателей надежности	Поступила 11.04.2025
и оптимизировать затраты на всех этапах жизненно-	Принята 18.06.2025
го цикла системы	© Автор(ы), 2026

Введение. В настоящее время современные комплексы средств и систем, обеспечивающие единство и точность шкалы времени (ШВ) пространственно-разнесенного инфраструктурного объекта, в большинстве случаев имеют древовидную, иерархическую структуру. В вершине топологии расположены ведущие часы, к которым подключены периферийные ведомые часы, подсистемы и сети, распределенные по инфраструктурному объекту и информационно объединенные сетью передачи данных.

Применительно к системе единого времени (СЕВ) космодрома основными компонентами являются подсистемы, располагаемые на стартовом и техническом комплексах (СК, ТК), измерительных пунктах (ИП) и других значимых инфраструктурных объектах космодрома.

Концепция объединенной системы, реализованная при создании СЕВ космодрома «Восточный», позволила достичь высоких эксплуатационных характеристик, и в целом имеет ряд преимуществ организационного и технического характера по сравнению с разрозненной системой. Среди прочих преимуществ отметим следующие: современная система частотно-временного обеспечения (ЧВО) поддерживает удаленный мониторинг за ходом ШВ составных частей и техническим состоянием компонентов системы, имеет высокий уровень автоматизации процессов управления и контроля, строится на основе однотипных блоков и модулей [1].

При проектировании подобных систем ЧВО необходимо всесторонне рассмотреть объект проектирования через оценку таких характеристик эффективности, как качество выходных сигналов, показатели надежности, скорость выхода системы на режим нормальной работы, время удержания ШВ в заданных пределах, устойчивость к влиянию внешних помех (в том числе преднамеренных), стоимостные показатели. Несмотря на очевидный прогресс, достигнутый в исследуемой области, и возросшую сложность технической реализации при создании современных комплексов и систем ЧВО используются методы, унаследованные от аналогичных разработок прошлых лет.

Систему единого времени космодрома зачастую рассматривают как набор функционально и структурно независимых подсистем, а декомпозицию СЕВ на подсистемы в большинстве случаев соотносят с распределением аппаратуры по объектам наземной космической инфраструктуры (НКИ). Например, к отдельным элементам относят подсистемы, распола-

гаемые на СК, ТК, ИП и других объектах. Для каждого элемента расчета строится структурная схема надежности (ССН) и проводится независимый расчет показателей надежности.

Этот метод часто описывается как структурный подход к расчету надежности. Преимуществом его использования при разработке распределенной системы реального времени является простота применения и четкое согласование подсистем с документацией по этим компонентам, что особенно полезно в процессе поэтапного развертывания.

На практике структурный подход часто не позволяет решать задачи, связанные с несколькими компонентами системы или набором оборудования, входящего в состав нескольких подсистем [2, 3]. Применение структурного подхода может приводить к искажению результатов расчета показателей, а также к неспособности учесть взаимозависимости между показателями надежности оборудования, задействованного в выполнении определенной функции, и показателями надежности любой другой функциональной группы. Следовательно, разработчик лишается инструмента для выявления слабых мест в конкретной функциональной группе и возможности внедрения соответствующих решений для повышения надежности или устранения структурной избыточности.

В этом контексте при разработке или совершенствовании СЕВ НКИ предлагается использовать алгоритм оценки надежности системы и ее составных частей с помощью функционального анализа [4].

Концепция функционального анализа в разных контекстах понимается по-разному [5]. В контексте настоящей работы функциональный анализ предполагает разбиение разрабатываемой системы на отдельные самостоятельные с точки зрения выполняемых задач функциональные группы оборудования в целях тщательной оценки показателей надежности каждой группы, выявления потенциальных неисправностей и анализа взаимозависимостей между группами [6]. Функциональная группа может представлять собой совокупность логически связанных компонентов, в том числе аппаратной части и программного обеспечения, и способна автономно выполнять строго определенный круг задач с требуемым уровнем надежности. Совокупность таких групп выполняет технологические операции для достижения основной цели — ЧВО потребителей.

Усовершенствованный алгоритм оценки показателей надежности.

Система единого времени является связующим звеном между эталонной ШВ (ЭШВ) национального стандарта и синхронизируемой аппаратурой технологической системы-потребителя, расположенной на объектах НКИ.

Проектирование СЕВ ведется в обратном порядке — от потребителя к ЭШВ. Одновременно решаются следующие задачи построения линии синхронизации: передача синхросигналов потребителю; формирование и хранение локальной ШВ объекта; сличение ШВ космодрома и ШВ национального стандарта.

Следовательно, для некоторой синхронизируемой системы-потребителя с известными исходными данными в части требований к характеристикам сигналов и надежности ЧВО можно представить схему линии синхронизации (рис. 1).

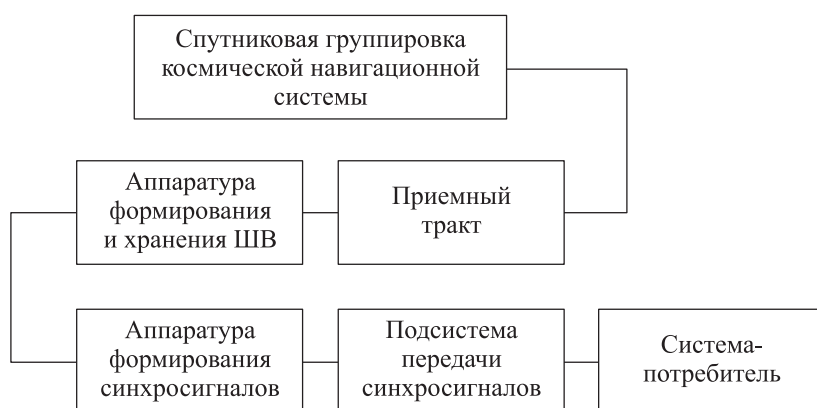


Рис. 1. Схема линии синхронизации технологической системы

Задачи, связанные с проектированием СЕВ, в общем случае можно разделить на группы:

- выполнение технических требований к параметрам информационного обмена с оборудованием систем-потребителей, включая требования к типу протокола связи или интерфейсу, характеристикам сигнала, типу физического соединения и т. д.;
- выполнение требований к заданному уровню надежности функции ЧВО;
- оптимизация затрат на разработку и последующую эксплуатацию СЕВ.

Необходимость функционального анализа при создании или модернизации современной СЕВ НКИ и ее декомпозиции на функциональные группы можно представить с помощью упрощенных схем (рис. 2, 3).

Упрощенные схемы современной СЕВ НКИ централизованной структуры и информационно-логического взаимодействия между составными частями по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) приведены на рис. 2. Так, в пусковых операциях выполняются задачи синхронизации

технологических процессов на СК и ИП, в том числе фиксация сигнала «Контакт подъема» средствами СЕВ СК и передача информации о точном времени старта от СК на ИП. Согласно результатам [7], в рассматриваемом случае функциональной группой аппаратуры, обеспечивающей пусковые операции, является совокупность подсистем СЕВ на СК, ИП и аппаратуры, задействованной в передаче информации (см. рис. 2, функциональная группа 1). Структурную схему надежности функциональной группы 1 можно представить как последовательность из трех элементов: СЕВ СК, СЕВ ИП, линии связи.

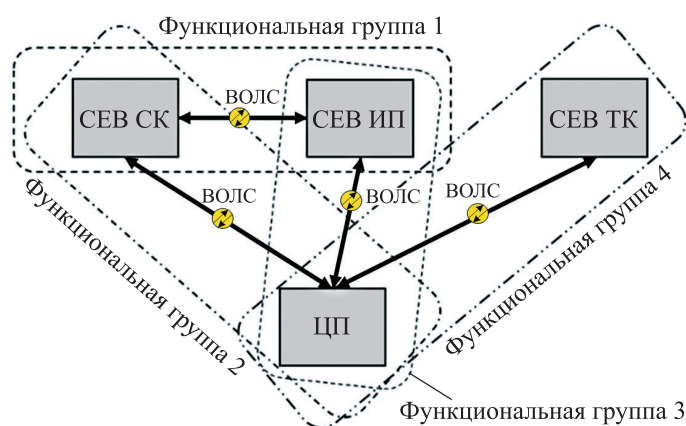


Рис. 2. Упрощенная схема современной СЕВ НКИ централизованной структуры и информационно-логического взаимодействия между составными частями (сплошные линии), осуществляемого по ВОЛС (ЦП — центральный пункт)

В свою очередь ЦП СЕВ и компоненты составных частей системы, задействованные в информационном взаимодействии с ЦП, представляются собой группы оборудования, в достаточной степени изолированные от других функций системы. Функция синхронизации ШВ подсистем от высокоточного ЦП представлена функциональными группами 2–4.

Частотно-временное обеспечение на техническом комплексе и других объектах космодрома, а также их взаимосвязи с ЦП и между собой могут быть рассмотрены в рамках отдельных функциональных групп.

Аналогично упрощенная схема функционального анализа составной части общекосмодромной системы на примере подсистемы СЕВ на СК приведена на рис. 3. Для синхронизации потребителей применяются различные технологии информационного взаимодействия, среди которых наиболее распространенным является интерфейс RS-485, и протокол NTP. Условно показано деление аппаратуры СЕВ СК на группы, выполняющие различные задачи.

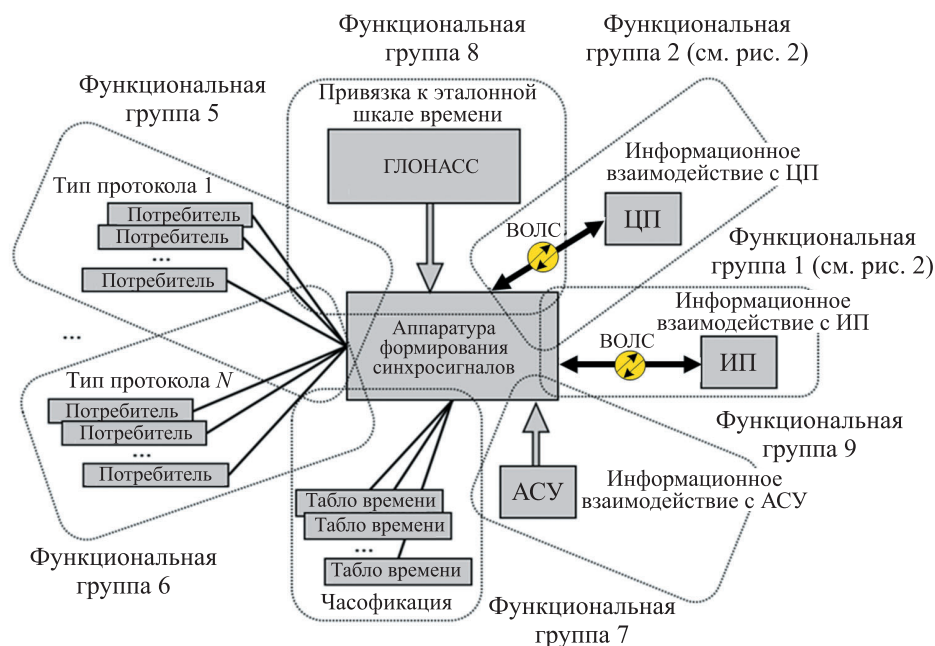


Рис. 3. Упрощенная схема функционального анализа составной части общекосмодромной системы на примере подсистемы СЕВ на СК (штриховыми линиями показаны имеющиеся функциональные группы)

В результате функционального анализа выявлено, что показатель вероятности безотказной работы (ВБР) отдельно взятой функции не совпадает с интегральным показателем, рассчитанным для подсистемы СЕВ по существующей методике расчета. Таким образом, СЕВ космодрома, использующая в составе различные технологии передачи синхросигналов, образующих независимые группы компонентов, должна быть рассмотрена как набор обособленных, самодостаточных функциональных групп, а требования к уровню надежности выполнения отдельных функций ЧВО должны задаваться разработчиками технологической аппаратуры.

С учетом результатов работ [8, 9] предложен алгоритм для оценки показателей надежности систем ЧВО НКИ на основе функционального анализа (рис. 4).

Началом работы по алгоритму является всесторонний сбор и анализ требований к системе (см. рис. 4, блок 1). На первом шаге оценивают результаты предыдущих исследований и разработок аналогичных систем, современные тенденции в области формирования и хранения частотно-временной информации и способов передачи кодов времени и частоты. Анализируют поступающие от разработчиков смежных систем исходные



Рис. 4. Блок-схема алгоритма оценки показателей надежности систем ЧВО НКИ на основе функционального анализа

данные, включающие в себя параметры информационного взаимодействия. Уточняют инженерно-технические аспекты, в том числе места размещения аппаратуры и другие требования, влияющие на топологию системы и применяемые технологии. Входные данные должны содержать

число, место расположения потребителей, указание на типы протокола информационного взаимодействия, требования к безопасности каналов передачи данных и др. К обязательным требованиям должны относиться целевой показатель надежности, например, коэффициент готовности, показатель ВБР, наработка между отказами, среднее время восстановления τ согласно [10, 11] и принятые нормативные документы. Таким образом, формулируются требования к техническому облику системы и ее компонентам (см. рис. 4, блок 2).

После формирования исходных данных следующим шагом алгоритма является рассмотрение СЕВ как суммы M функционально самодостаточных групп для всех режимов работы оборудования системы (см. рис. 4, блок 3). Наличие блока 3 в алгоритме представляет собой основное усовершенствование подхода к проектированию СЕВ.

В ходе декомпозиции СЕВ на функциональные группы (см. рис. 4, блоки 4–8) осуществляется поиск наиболее эффективного варианта исполнения каждой функциональной группы методом прямого перебора с составлением логико-графической ССН каждой группы.

Оценка показателей надежности обычно проводится на этапах проектирования, испытания и эксплуатации. Конкретная математическая модель расчета и входные параметры выбирают в зависимости от этапа, на котором проводится оценка, а также от топологии и сложности исследуемого функционального блока [9]. В частности, на этапе разработки рабочей документации оценка уровня надежности i -й функциональной группы проводится расчетным методом с построением ССН (см. рис. 4, блок 5) и, если необходимо, то с помощью графа состояний в рамках дискретно-событийного имитационного моделирования. По справочным данным и данным ТУ комплектующих изделий вычисляют показатели надежности (см. рис. 4, блок 6). Рассчитывают среднее время восстановления. На этапах изготовления и проведения испытаний уровень надежности оценивается расчетно-экспериментальным методом с использованием полученных статистических данных. При этом оцениваемым показателем надежности является нижняя доверительная граница показателя ВБР за расчетный цикл подготовки к работе и эквивалентный объем испытаний, необходимый для подтверждения требований по надежности.

На следующем шаге проводится анализ видов и последствий отказов с установлением возможных взаимовлияний и составлением функциональных групп (см. рис. 4, блок 7), ранжируются элементы по степени критичности [7]. Следует отметить, что при анализе возможных отказов

должны оцениваться не только показатели надежности оборудования и программного обеспечения, но также алгоритмы технологических процессов, происходящих внутри системы, и логика информационного взаимодействия с аппаратурой смежных систем [9].

Алгоритмический процесс продолжается до тех пор, пока не будет собран набор функциональных компонентов, отвечающих заданным требованиям к показателям надежности и составляющих облик разрабатываемой системы (см. рис. 4, блоки 8, 9).

Согласно существующему подходу, при расчете показателя надежности СЕВ функция привязки к ЭШВ не учитывается. Это означает, что элемент $R_{ЭШВ}$ математической модели принимается равным единице. Важно оценивать показатель $R_{ЭШВ}$ вне зависимости от выбранного метода сличения ШВ [12–16].

На основе алгоритма предлагается базовая математическая модель определения показателя надежности функции синхронизации системы потребителя, учитывающая в качестве набора элементов расчета (f) различные показатели надежности. К этим показателям относятся показатели надежности функций привязки к ШВ национального стандарта, формирования и хранения ШВ, формирования выходных сигналов системы ($R_{ЭШВ}$, $R_{СЕВ}$), функции передачи потребителям кодов времени ($R_{ПРД}$) и частоты (R_k), а также обобщенный показатель надежности систем инженерно-технического обеспечения (R_O), поддерживающих функционирование подсистем СЕВ, в том числе систем электроснабжения, кондиционирования, защиты информации и других:

$$P_i = f \{ R_{ЭШВ}, R_{СЕВ}, R_{ПРД}, R_O, R_k \}. \quad (1)$$

Если подсистема передачи частотно-временной информации имеет сложную сетевую структуру, то в качестве модели надежности рекомендуется формировать аналитическую модель, опираясь на теорию сетей массового обслуживания [17–19]. В противном случае анализируется структурная избыточность сети. Такие методы, как метод минимальных путей и сечений, применять нецелесообразно, поскольку структура сетей передачи информации в большинстве случаев не является произвольной и, как правило, нет сложных структур резервирования.

Дальнейшая количественная оценка i -й функциональной группы, например ВБР, с применением структурного анализа осуществляется по зависимостям последовательно $P_n(t)$ и параллельно $P_p(t)$ соединенных элементов:

$$P_n(t) = \exp \left(- \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i \right); \quad (2)$$

$$P_p(t) = \left[\exp \left(- \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i \right) \right] \left(1 + \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i \right), \quad (3)$$

где P_p — ВБР для ССН параллельного вида; λ_i — интенсивность отказов элементов схемы; t_i — время работы i -го элемента; n — число соединенных элементов.

Вероятность безотказной работы функциональной группы:

$$P_{\text{ФГ}}(t) = \prod_{i=1}^k P_i(t). \quad (4)$$

Применение функционального анализа позволяет рассматривать систему как совокупность отдельных подсистем, каждая из которых выполняет определенную роль в системе. Такой подход позволяет расставлять приоритеты на основе оценки критичности выполняемых функций, уточнять требования к показателям надежности для отдельных функциональных групп, что может помочь в снижении затрат на разработку и обслуживание не критичных компонентов СЕВ. Набор функциональных групп, называемый также функционально-конструктивным делением системы [7], для наглядности может быть приведен в виде типовой таблицы (ФГ — функциональная группа).

Пример функционально-конструктивного деления СЕВ

Объект НКИ	Система-потребитель	Типы информационного взаимодействия					
		Протокол NTP	Интерфейс RS-485	Импульс		Протокол NTP	Интерфейс RS-485
СК	1	ФГ _i			...		
	2		ФГ _i				
	...	...	...	...		...	...
	n						ФГ _i
ТК	1	ФГ _i					
	2		ФГ _i				
	...	...	...	...		...	...
	n					ФГ _i	
ИП	1	ФГ _i	ФГ _i	ФГ _i			
	2	ФГ _i					

Объект НКИ	Система- потребитель	Типы информационного взаимодействия					
		Протокол NTP	Интерфейс RS-485	Импульс	...	Протокол NTP	Интерфейс RS-485
	...	...	...	...		...	...
	<i>n</i>					ФГ _{<i>i</i>}	
...	...	...	...	...		...	...
...		Более критичные			Менее критичные		
		Степень критичности сбоя ЧВО					

После проработки всех функциональных групп приступают к объединению однотипных групп в конструктивные подсистемы и проводят, например, расчет ВБР для группы скользящего нагруженного резервирования.

Допускается, что в некоторых случаях необходима интегральная оценка показателя надежности системы, включающей в себя множество функциональных групп. В таком случае необходимо использовать соответствующую зависимость для расчета обобщающего показателя. Степень влияния отказа отдельной функциональной группы на работу системы в таком случае может учитываться с помощью весовых характеристик, получаемых экспертным методом.

Заключение. Проведены выборочные повторные оценки показателей надежности ранее разработанных систем, выявлены слабые звенья при выполнении задач синхронизации технологических процессов. Опираясь на результаты расчетов, можно сделать вывод о том, что первоначальным этапом при разработке СЕВ является определение отдельно выполняемых задач ЧВО и самодостаточных функциональных групп, решающих эти задачи, с последующими расчетами показателей надежности для каждой группы.

Функциональный анализ позволяет выявлять слабые звенья внутри отдельных функциональных групп и принимать решения по пересмотру конструкции системы для ее усиления или устранения структурной избыточности, что положительно сказывается на соответствующих затратах на разработку, изготовление, испытания и дальнейшую эксплуатацию системы.

Оценивая показатели надежности современной СЕВ по интегральным показателям, следует иметь в виду, что результаты могут приводить к ошибочной интерпретации полученных данных.

Кроме того, предложенные усовершенствования метода оценки надежности и алгоритм оценки могут служить пошаговым руководством при модернизации и разработке систем ЧВО, в том числе перспективных когерентных систем связи и синхронизации инфраструктурных объектов, решающих задачу снижения зависимости от спутниковых радионавигационных систем в вопросе сличения ШВ объекта и национального стандарта [19, 20]. Предполагается, что детальная проработка топологии функциональных групп СЕВ космодрома позволит добиваться ощутимого снижения затрат на создание, модернизацию и эксплуатацию систем ЧВО.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лоховин В.А. Развитие частотно-временного обеспечения объектов наземной космической инфраструктуры на примере разработки системы единого времени космодрома «Восточный». *Сб. докл. Всерос. молодеж. науч.-практ. конф. «Орбита молодежи» и перспективы развития Российской космонавтики*. Томск, ТПУ, 2017, с. 75–76. EDN: ZUWYJT
- [2] Мазуренко Д.К. Сетевые решения построения пакетной сети распределения сигналов единого точного времени. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2015, т. 9, № 4, с. 67–71. EDN: TXHLQD
- [3] Буренин А.Н., Голубев В.Е., Легков К.Е. Организация подсистемы обеспечения единым временем решающих элементов автоматизированной системы управления сложными организационно-техническими объектами специального назначения. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2018, т. 12, № 2, с. 27–34. DOI: <http://doi.org/10.24411/2072-8735-2018-10028>
- [4] Лоховин В.А., Бармин И.В. Алгоритм оценки показателей надежности систем частотно-временного обеспечения наземной космической инфраструктуры с использованием функционального анализа. *XLVII Академические чтения по космонавтике 2023. Сб. тез. Т. 2*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, с. 253–255. EDN: DHQEFB
- [5] Глебов И.В., Митрюхин А.Д. О функциональной надежности регенерационных систем жизнеобеспечения пилотируемых космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, № 6. DOI: <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-6-1987>
- [6] Ларин В.П., Шелест Д.К. Формирование информационного обеспечения надежности бортовой аппаратуры на стадии проектирования. *Информационно-управляющие системы*, 2012, № 4, с. 93–97. EDN: PDFLYL
- [7] Антошина В.М., Якимов В.Л. Описание статистики отказов конструктивных элементов multifunctional радиолокационных станций по экспериментальным данным. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2018, № 12, с. 396–404. EDN: YTEKZN

- [8] Подкопаев А.В., Подкопаев И.А. Централизованный адаптивный алгоритм оценки безопасности сложных технических систем различной энтропии. *Надежность и качество сложных систем*, 2020, № 3, ст. 3320.
DOI: <http://doi.org/10.21685/2307-4205-2020-3-3>
- [9] Kumar V., Singh L., Tripathi A.K. Reliability analysis of safety-critical and control systems: a state-of-the-art review. *IET Softw.*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 1–48.
DOI: <http://doi.org/10.1049/IET-SEN.2017.0053>
- [10] Коваленко И.Н., Кузнецов Н.Ю. Методика расчета высоконадежных систем. М., Радио и связь, 1988.
- [11] Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М., Наука, 1965.
- [12] Piester D., Rost M., Fujieda M., et al. Remote atomic clock synchronization *via* satellites and optical fibers. *Adv. Radio Sc.*, 2011, vol. 9, pp. 1–7.
DOI: <https://doi.org/10.5194/ars-9-1-2011>
- [13] Липатников Л.А. О методике точного дифференциального позиционирования (Precise point positioning) и перспективах ее совершенствования. *Сб. матер. VIII Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо Гео-Сибирь–2012»*. Т. 7. Новосибирск, Изд-во СГТА, 2012, с. 48–53. EDN: QITTVQV
- [14] Скакун И.О. Сличение шкал времени с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. *Труды МАИ*, 2014, № 73.
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=48570>
- [15] Крючков И.В., Филатов А.А. Синхронизация подвижных модулей распределенных радиолокационных комплексов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 8. DOI: <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-8-316>
- [16] Бирюков Н.Л., Триска Н.Р., Худынцев Н.Н. Обзор направлений исследований МСЭ в области частотно-временного обеспечения современных сетей связи. *Т-Сотт. Частотно-временное обеспечение*, 2014, № 2, с. 12–17. EDN: SARHXT
- [17] Бутакова И.А., Линденбаум М.Д., Москат Н.А. Расчет надежности функционирования отраслевых информационных сетей. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*, 2009, № 5, с. 32–37. EDN: KZGNHT
- [18] Новиков О.В., Петухов С.И. Прикладные вопросы теории массового обслуживания. М., Советское радио, 1969.
- [19] Лоховин В.А., Шварц М.Л., Рыжков А.В. Перспективные направления развития систем связи и синхронизации сложных инфраструктурных объектов. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2024, т. 18, № 11, с. 30–37.
DOI: <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2024-18-11-30-37>
- [20] Lokhovin V.A., Schwartz M.L., Ryzhkov A.V., et al. Communication & synchronization systems of complex infrastructure facilities. Directions for future development. *SYNCHROINFO*, 2024.
DOI: <http://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617652>

Бармин Игорь Владимирович — чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, советник генерального директора по науке АО «ЦЭНКИ» (Российская Федерация, 129110, Москва, ул. Щепкина, д. 42, стр. 1, 2); заведующий кафедрой «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Лоховин Владимир Александрович — начальник отдела технического сопровождения монтажных, наладочных работ испытаний АО «ЦЭНКИ» (Российская Федерация, 129110, Москва, ул. Щепкина, д. 42, стр. 1, 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бармин И.В., Лоховин В.А. Алгоритм оценки показателей надежности систем частотно-временного обеспечения наземной космической инфраструктуры на основе функционального анализа. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2026, № 1 (156), с. 22–38. EDN: ELONTC

AN ALGORITHM FOR EVALUATING SYSTEM RELIABILITY INDICATORS TIME-FREQUENCY SUPPORT OF GROUND-BASED SPACE INFRASTRUCTURE BASED ON FUNCTIONAL ANALYSIS

I.V. Barmin^{1,2}

barmin@bmstu.ru

V.A. Lohovin¹

v.lohovin@russian.space

¹ JSC “TsENKI”, Moscow, Russian Federation

² BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

The synchronicity of the functioning of numerous technological systems involved in the preparation and launch of space rockets is one of the main requirements for ground-based complexes of spaceports. Almost all positions at modern spaceports (launch and technical complexes, measuring points, astronomical, geodetic and meteorological complexes) are equipped with single-time systems in order to synchronize technological systems located at the facilities. When designing single-time systems, special attention is paid to ensuring the specified reliability indicators, eliminating structural redundancy and reducing cost indicators. The calculation methods currently used do not take into account the functional interaction between the components of modern single-time systems and need to be clarified. The clarification should relate to the ways of ranking individual functional groups of the system according

Keywords

Unified time system, functional analysis, reliability indicators, ground-based space infrastructure, life cycle

to the degree of criticality. The article considers the possibility of using functional analysis to assess the reliability of single-time systems of the ground-based space infrastructure, and an algorithm is proposed that allows system decomposition. The updated methodology will become the basis of a step-by-step guide for each stage of the development of single-time systems, thereby improving the quality of reliability assessment and optimizing costs at all stages of the system life cycle

Received 11.04.2025

Accepted 18.06.2025

© Author(s), 2026

REFERENCES

- [1] Lokhovin V.A. [The development of time and frequency distribution system for ground-based space infrastructure, exemplified by time and frequency distribution system at the Vostochny Cosmodrome]. *Sb. dokl. Vseros. molodezh. nauch.-prakt. konf. "Orbita molodezhi" i perspektivy razvitiya Rossiyskoy kosmonavtiki* [Proc. Russ. Youth Sc.-Pract. Conf. Orbit of Youth and Prospects for the Development of Russian Cosmonautics]. Tomsk, TPU Publ., 2017, pp. 75–76 (in Russ.). EDN: ZUWYJT
- [2] Mazurenko D.K. Network reference model of the UTC distribution for the packet networks. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm], 2015, vol. 9, no. 4, pp. 67–71 (in Russ.). EDN: TXHLQD
- [3] Burenin A.N., Golubev V.E., Legkov K.E. The organization of the subsystem software unified time critical elements of an automated system of control of complex organizational-technical facilities for special purposes. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm], 2018, vol. 12, no. 2, pp. 27–34 (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.24411/2072-8735-2018-10028>
- [4] Lokhovin V.A., Barmin I.V. [Functional analysis-based algorithm for assessing reliability indicators of time and frequency systems of the ground-based space infrastructure]. *XLVII Akademicheskie chteniya po kosmonavtike 2023. Sb. tezisov. T. 2* [XLVII Academic Readings on Cosmonautics 2023. Abstracts. Vol. 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2023, pp. 253–255 (in Russ.). EDN: DHQEFB
- [5] Glebov I.V., Mitryukhin A.D. On the functional reliability of the regenerative life support systems for manned spacecraft. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2020, no. 6 (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-6-1987>
- [6] Larin V.P., Shelest D.K. Shaping of the information support for reliability of onboard equipment at the design stage. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 4, pp. 93–97 (in Russ.). EDN: PDFLYL
- [7] Antoshina V.M., Yakimov V.L. Description of multifunctional radar stations constructive failure statistics elements by experimental data. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2018, no. 12, pp. 396–404 (in Russ.). EDN: YTEKZN

- [8] Podkopaev A.V., Podkopaev I.A. Centralized adaptive algorithm for evaluating the reliability of complex technical systems of various entropy. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and Quality of Complex Systems], 2020, no. 3, art. 3320 (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.21685/2307-4205-2020-3-3>
- [9] Kumar V., Singh L., Tripathi A.K. Reliability analysis of safety-critical and control systems: a state-of-the-art review. *IET Softw.*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 1–48. DOI: <http://doi.org/10.1049/IET-SEN.2017.0053>
- [10] Kovalenko I.N., Kuznetsov N.Yu. Metodika rascheta vysokonadezhnykh system [Design of highly reliable systems]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1988.
- [11] Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovyev A.D. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti [Mathematical methods in reliability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1965.
- [12] Piester D., Rost M., Fujieda M., et al. Remote atomic clock synchronization *via* satellites and optical fibers. *Adv. Radio Sc.*, 2011, vol. 9, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.5194/ars-9-1-2011>
- [13] Lipatnikov L.A. [On precise point positioning and its future development]. *Sb. Mater. VIII Mezhdunar. nauch. kongr. "Interespo Geo-Sibir-2012". T. 7* [Proc. VIII Int. Sc. Cong. Interespo Geo-Sibir-2012. Vol. 7]. Novosibirsk, SGGa Publ., 2012, pp. 48–53 (in Russ.). EDN: QITTQV
- [14] Skakun I.O. Time scales comparison using the signals of global navigation satellite systems. *Trudy MAI*, 2014, no. 73 (in Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=48570>
- [15] Kryuchkov I.V., Filatov A.A. Synchronization of the movable modules of distributed radar complexes. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 8 (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-8-316>
- [16] Biryukov N.L., Triska N.R., Khudyntsev N.N. ITU research overview of communications networks frequency-time support. *T-Comm. Chastotno-vremennoe obespechenie* [T-Comm], 2014, no. 2, pp. 12–17 (in Russ.). EDN: SARHXT
- [17] Butakova I.A., Lindenbaum M.D., Moskat N.A. Calculation of operational reliability of branch informational networks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences], 2009, no. 5, pp. 32–37 (in Russ.). EDN: KZGHHT
- [18] Novikov O.V., Petukhov S.I. Prikladnye voprosy teorii massovogo obsluzhivaniya [Applied issues of queuing theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1969.
- [19] Lokhovin V.A., Shvarts M.L., Ryzhkov A.V. Development trends regarding communication and synchronization systems of complex infrastructure facilities. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm], 2024, vol. 18, no. 11, pp. 30–37 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2024-18-11-30-37>

[20] Lokhovin V.A., Schwartz M.L., Ryzhkov A.V., et al. Communication & synchronization systems of complex infrastructure facilities. Directions for future development. *SYNCHROINFO*, 2024.

DOI: <http://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617652>

Barmin I.V. — Corresponding Member of the RAS, Dr. Sc. (Eng.), Advisor to the CEO, JSC “TsENKI” (Shchepkina ul. 42, str. 1, 2, Moscow, 129110 Russian Federation); Head of the Department of Launch Rocket Systems, BMSTU (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Lokhovin V.A. — Head of the Technical Support, Department for Installation, Commissioning and Testing, JSC “TsENKI” (Shchepkina ul. 42, str. 1, 2, Moscow, 129110 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Barmin I.V., Lokhovin V.A. An algorithm for evaluating system reliability indicators time-frequency support of ground-based space infrastructure based on functional analysis. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2026, no. 1 (156), pp. 22–38 (in Russ.). EDN: ELONTC