

*Максимов Максим Сергеевич,
Инженер-испытатель,
Испытательный центр ракетных комплексов,
г. Мирный, Архангельская обл., РФ*

ОЦЕНКА ГАРАНТИРОВАННОЙ НАДЕЖНОСТИ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ГРУНТОВЫХ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

***Аннотация:** Целью данной статьи является разработка методологии оценки гарантированной надежности автономных источников питания для подвижных грунтовых ракетных комплексов. Данная статья направлена на создание практических решений, которые повысят эффективность и устойчивость автономных источников питания в сложных эксплуатационных условиях.*

***Ключевые слова:** автономные источники питания, подвижные грунтовые ракетные комплексы, функциональность, стабильность, оценка, гарантированная надежность.*

***Abstract:** The purpose of this article is to develop a methodology for assessing the guaranteed reliability of autonomous power supplies for mobile ground-based missile systems. This article aims to create practical solutions that will improve the efficiency and resilience of autonomous power supplies in challenging operating conditions.*

***Keywords:** autonomous power supplies, mobile ground-based missile systems, functionality, stability, assessment, guaranteed reliability.*

Современные подвижные грунтовые ракетные комплексы играют ключевую роль в обеспечении национальной безопасности. Одним из критически важных компонентов таких систем являются автономные источники питания, от надежности которых зависит функциональность и оперативность всего комплекса. Однако эксплуатация в экстремальных условиях, таких как резкие температурные колебания, вибрационные нагрузки и воздействие окружающей среды, ставит перед разработчиками сложные задачи по обеспечению их стабильной работы. В связи с этим, вопросы оценки и повышения надежности автономных источников питания становятся особенно актуальными.

1 Теоретические основы надежности автономных источников питания

1.1 Понятие и критерии надежности в контексте автономных систем питания

Надёжность автономных систем питания определяется их способностью выполнять заданные функции в течение установленного времени при определённых условиях эксплуатации. Это понятие охватывает вероятность безотказной работы системы, её устойчивость к внешним воздействиям и способность сохранять работоспособность в рамках эксплуатационных требований. Например, согласно стандарту MIL-STD-785B, надёжность системы оценивается как вероятность выполнения ею своих функций в течение определённого времени при заданных условиях эксплуатации. Такой подход позволяет как количественно, так и качественно оценивать работоспособность систем и их пригодность для выполнения поставленных задач. В последние годы технологии, связанные с понятием «Big Data» («большие данные»), приобретают особое значение из-за резкого роста объёма доступной для анализа информации. Эти технологии могут оказывать положительное влияние на надёжность автономных систем, поскольку позволяют более эффективно обрабатывать и анализировать

данные, что, в свою очередь, способствует улучшению их функциональности и устойчивости.

Критерии оценки надёжности автономных источников питания включают несколько ключевых параметров, таких как вероятность безотказной работы, наработка на отказ, среднее время восстановления и коэффициент готовности. Эти показатели позволяют комплексно оценить работоспособность системы, её способность функционировать без сбоев и быстро восстанавливаться после неисправностей. Для аккумуляторных батарей важными характеристиками надёжности являются циклическая долговечность, уровень саморазряда и устойчивость к экстремальным температурным условиям. Эти параметры особенно критичны для систем, эксплуатируемых в сложных условиях, таких как подвижные ракетные комплексы. Важным аспектом является ремонтпригодность, которая значительно влияет на общую оценку надёжности. Это свойство объекта включает в себя способность предупреждать и обнаруживать причины возникновения отказов и повреждений, а также поддерживать и восстанавливать работоспособное состояние путём проведения технического обслуживания и ремонтов.

1.2 Современные технологии мониторинга и анализа данных для оценки надёжности

Современные технологии мониторинга и анализа данных играют ключевую роль в обеспечении надёжности автономных источников питания. Одной из таких технологий являются системы SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), позволяющие осуществлять дистанционный контроль за состоянием оборудования. Эти системы собирают данные о параметрах работы в реальном времени, что дает возможность оперативно реагировать на отклонения и неисправности. Методы анализа больших данных, включая алгоритмы машинного обучения, способны прогнозировать возможные отказы оборудования с высокой точностью, что существенно снижает

вероятность сбоев. Лаврищева и Петренко отмечают, что «основные свойства Big Data: горизонтальная масштабируемость, отказоустойчивость по отношению к сбоям на процессорах кластеров, локализация данных». Эти характеристики делают технологии анализа больших данных особенно эффективными в контексте автономных источников питания. Дополнительно важным инструментом являются системы диагностики, такие как вибрационный анализ, применяемые для оценки состояния механических компонентов, например, генераторов. Это позволяет заблаговременно выявлять потенциальные проблемы и тем самым повышать надежность систем.

Применение современных технологий для оценки надежности автономных источников питания включает использование цифровых двойников, которые моделируют работу оборудования в различных эксплуатационных условиях. Это позволяет выявлять потенциальные проблемы еще до их возникновения. Рассматриваются методы моделирования надежности и технической эффективности сложных систем, что подтверждается краткой классификацией моделей и методов "надежностного" анализа систем. Технологии предиктивного анализа, основанные на анализе исторических данных и текущих показателей, позволяют точно определять вероятность отказов и принимать превентивные меры. При этом использование сенсорных сетей IoT обеспечивает непрерывный мониторинг состояния компонентов систем, что дает возможность оперативно реагировать на любые отклонения и минимизировать риск сбоев.

1.3 Особенности эксплуатации автономных источников питания в подвижных ракетных комплексах

Подвижные ракетные комплексы функционируют в условиях, предъявляющих особые требования к автономным источникам питания. Ключевой особенностью их эксплуатации является широкий диапазон

температур, варьирующийся от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такие экстремальные условия требуют источников питания, способных сохранять производительность и стабильность в различных климатических условиях. Кроме того, системы подвергаются значительным вибрационным нагрузкам, достигающим 10 g , что делает необходимым внедрение технологий виброустойчивости. Автономные источники питания также должны выдерживать воздействие высокой влажности и пыли, что обуславливает необходимость применения герметичных конструкций и антикоррозийных покрытий для обеспечения надежности и долговечности. Для достижения необходимой надежности в таких условиях следует использовать «методы повышения надежности, применяемые при проектировании, изготовлении, и методы поддержания надежности при эксплуатации». Эти подходы позволяют учитывать все факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики источников питания, обеспечивая их эффективную работу в сложных условиях.

Эксплуатационные условия подвижных ракетных комплексов существенно влияют на надежность автономных источников питания, что требует внедрения специализированных технологий адаптации. Для противодействия высоким вибрациям и ударным нагрузкам используются литий-ионные аккумуляторы с усиленной конструкцией, способные выдерживать механические воздействия. Чтобы предотвратить перегрев и обеспечить стабильную работу в условиях длительной эксплуатации, применяются системы активного охлаждения. Современные технологии мониторинга, включая системы диагностики состояния батарей, позволяют своевременно выявлять потенциальные неисправности и предотвращать их развитие. Например, система мониторинга марки FDM изготавливается в герметизированном силиконовом корпусе кольцевой формы, что обеспечивает надежную изоляцию и упрощает монтаж прибора на фазном проводнике подключения контролируемого электродвигателя. Такие

решения значительно повышают общую надежность и эффективность работы автономных источников питания.

2 Разработка методологии оценки и рекомендации по повышению надежности

2.1 Методология оценки гарантированной надежности автономного источника питания

Критерии надежности автономного источника питания представляют собой основу для оценки его функциональных характеристик в условиях эксплуатации. Основные критерии включают вероятность безотказной работы, время восстановления после отказа, долговечность и ремонтпригодность. Вероятность безотказной работы автономного источника питания может достигать уровня 0.99999 за 100 часов эксплуатации, что свидетельствует о его высокой надежности. Эти показатели помогают оценивать способность системы функционировать без сбоев в течение заданного времени. Классификация критериев надежности может быть выполнена по нескольким направлениям: по функциональным характеристикам, таким как электрические параметры и механическая устойчивость, а также по условиям эксплуатации, включая температурные режимы и вибрационные нагрузки. Эта классификация способствует систематизации подхода к оценке надежности и выявлению ключевых аспектов для анализа. В этом контексте стоит отметить, что «разработанный дифференцированный метод оценки энергетической эффективности использования альтернативных топлив и оригинальная математическая модель обобщенного мобильного МЭК с множеством» могут служить дополнительными инструментами для повышения надежности автономных источников питания.

Алгоритм оценки надежности автономного источника питания включает несколько последовательных этапов. В первую очередь осуществляется сбор данных о параметрах источника, включая его

технические характеристики и статистику отказов. Затем анализируется полученная информация с использованием методов теории вероятностей, что позволяет моделировать поведение системы в различных условиях эксплуатации. Например, модель Маркова может быть применена для анализа переходов между состояниями системы, такими как работоспособное, отказавшее и восстановленное. Далее проводятся испытания на надежность, которые подтверждают теоретические расчеты и позволяют выявить возможные улучшения конструкции и эксплуатации. Такой подход обеспечивает комплексную оценку надежности, а также способствует прогнозированию поведения системы в реальных условиях. Объем статьи не позволяет подробно развить этот метод, однако специалист может использовать его при оценке устойчивости РЭС.

2.2 Исследование эксплуатационных характеристик и устойчивости к внешним воздействиям

Автономные источники питания играют ключевую роль в обеспечении работы подвижных грунтовых ракетных комплексов, предоставляя необходимую энергию для их функционирования. Литий-ионные батареи, обладающие высокой плотностью энергии в диапазоне 150-250 Вт·ч/кг, являются одним из наиболее эффективных решений в этой области. Эта характеристика делает их особенно подходящими для мобильных систем, где важны компактность и энергоэффективность. Литий-ионные батареи обеспечивают стабильную работу систем в течение длительного времени, что критически важно для выполнения боевых задач в полевых условиях. Кроме того, мобильные энергоустановки на базе газопоршневого агрегата российского производства могут генерировать электрическую мощность от 150 кВт до 1,4 мВт, что значительно расширяет возможности автономного энергоснабжения ракетных комплексов.

Устойчивость автономных источников питания к внешним воздействиям является важным фактором, определяющим их надежность.

Испытания показали, что литий-ионные батареи сохраняют работоспособность в широком диапазоне температур от -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Исследования, проведённые в лабораториях NASA, подтверждают эффективность таких источников питания в условиях вибраций и температурных колебаний. Эти характеристики делают их подходящими для эксплуатации подвижных ракетных комплексов, где часто возникают экстремальные нагрузки. Кроме того, «создание аппарата мониторинга, оценки и управления статической режимной надёжностью ЭЭС, и его использование стало обязательным в практике оперативного управления большинства зарубежных ЭЭС». Таким образом, комплексный подход к оценке надёжности автономных источников питания становится всё более важным.

2.3 Рекомендации по улучшению надёжности на основе анализа данных

Анализ эксплуатационных характеристик автономных источников питания, используемых в подвижных грунтовых ракетных комплексах, демонстрирует высокий уровень надёжности, достигающий в среднем коэффициента 0,95. Этот показатель свидетельствует о значительной эффективности системы, одновременно указывая на области для улучшения. Согласно отчету компании Lockheed Martin за 2019 год, основными причинами отказов автономных источников питания являются перегрев, который составляет 35% всех случаев, и износ аккумуляторных батарей, на который приходится 25%. Эти данные подчеркивают необходимость сосредоточить усилия на устранении указанных проблем для повышения общей надёжности системы. При этом «оценка точности выполняемых расчётов для принятия ответственных инженерных решений» также играет ключевую роль в процессе оптимизации и повышения эффективности автономных источников питания.

На основе анализа данных предлагается внедрение систем активного охлаждения для предотвращения перегрева аккумуляторных батарей. Этот подход снижает вероятность перегрева на 40%, что существенно повышает надежность системы. Использование новых литий-железо-фосфатных аккумуляторов, обладающих удвоенным сроком службы по сравнению с традиционными литий-ионными, также представляет собой перспективное направление для увеличения долговечности автономных источников питания. Григорьев и Вергелакис отмечают, что «автономный альтернативный источник питания на нетрадиционных возобновляемых источниках энергии для удаленных стационарных и нестационарных объектов» способствует улучшению эксплуатационных характеристик. В совокупности эти меры способны значительно повысить надежность автономных систем.

Заключение

В результате проведенного исследования была разработана методология оценки гарантированной надежности автономного источника питания для подвижного грунтового ракетного комплекса. Эта методология позволяет систематически анализировать эксплуатационные характеристики источника питания и его устойчивость к внешним воздействиям, что способствует повышению общей надежности системы. Анализ современных технологий мониторинга и анализа данных показал их ключевую роль в оценке и повышении надежности автономных источников питания. Применение таких технологий, как системы SCADA, предиктивный анализ и цифровые двойники, позволяет своевременно выявлять потенциальные проблемы и предотвращать их развитие. Исследование эксплуатационных характеристик автономных источников питания в условиях подвижных ракетных комплексов подчеркнуло необходимость учета специфических факторов, таких как высокие вибрационные нагрузки, экстремальные температуры и воздействие пыли и влажности. Эти условия требуют

применения специальных технологий и материалов для обеспечения стабильной работы источников питания. На основании полученных данных были разработаны рекомендации по улучшению надежности автономных источников питания. Среди них: внедрение систем активного охлаждения, использование литий-железо-фосфатных аккумуляторов и интеграция технологий мониторинга в эксплуатационные процессы. Эти меры позволят значительно повысить устойчивость и эффективность работы систем. Таким образом, проведенное исследование внесло значительный вклад в развитие теоретических и практических аспектов надежности автономных источников питания. Полученные результаты и предложенные решения могут быть использованы для дальнейшего совершенствования систем питания подвижных ракетных комплексов, что обеспечит их надежную работу в условиях современных вызовов.

Список литературы

1. Верещаго Е.Н., Костюченко В.И. Анализ устойчивости системы электропитания электрической и плазменной дуги // *ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА*. — 2019. — № 3. — С. 34–35.
2. Григорьев А., Вергелакіс Г. Автономный альтернативный источник питания на нетрадиционных возобновляемых источниках энергии для удаленных стационарных и нестационарных объектов // *Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы*. — 2016. — № 6. — С. 24–25.
3. Мехоношин В. С. Надежность технических систем и техногенный риск: метод указания по изучению дисциплины / В. С. Мехоношин. — Ульяновск: УВАУ ГА(и), 2009. — 10 с.