

**К. В. БЕЗРУЧКО**, докт. техн. наук, гл. научн. сотр., НАУ «ХАИ»  
Харьков;  
**А. О. ДАВИДОВ**, канд. техн. наук, вед. научн. сотр., НАУ «ХАИ»,  
Харьков;  
**А. А. ХАРЧЕНКО**, старш. научн. сотр., НАУ «ХАИ», Харьков;  
**В. П. ФРОЛОВ**, канд. техн. наук, нач. отдела Государственное  
предприятие «Конструкторское бюро «Южное» имени М.К. Янгеля,  
Днепропетровск

## **АНАЛИЗ СТРУКТУР И СРЕДСТВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ СОВРЕМЕННЫХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ**

В статье рассмотрены характеристики систем электроснабжения современных стартовых комплексов: РКК «Днепр», РКК «Циклон-4», РКК «Зенит-2». Рассмотрены типичные нарушения систем электроснабжения стартовых комплексов и показано признаки введения в состав систем электроснабжения дополнительных мер защиты. Приведены варианты построения систем бесперебойного электроснабжения стартовых комплексов.

В статті розглянуто характеристики систем електропостачання сучасних стартових комплексів: РКК «Дніпро», РКК «Циклон-4», РКК «Зеніт-2». Розглянуто типові порушення систем електропостачання стартових комплексів та показано ознаки введення до складу систем електропостачання додаткових заходів захисту. Приведено варіанти побудови систем безперебійного електропостачання стартових комплексів.

In this paper the characteristics of the power-supply systems of modern launchers (SRC “Dnepr”, SRC “Cyclone-4”, RSC “Zenith-2”) are considered. Typical failures of power-supply systems of launchers are considered. Characteristics of the injection of follow-up actions of protection in the power-supply systems are considered. Versions of the construction power-supply systems of launchers are analyzed.

**Введение.** Сейчас в мире построены и активно используются двенадцать космодромов. Каждый из них – уникальный технологический комплекс для подготовки и запуска ракет-носителей с различными космическими аппаратами, пилотируемыми кораблями, межпланетными станциями. Основу космодрома составляют один или несколько ракетно-космических комплексов, предназначенных для проведения пуска ракет-носителей различного класса.

Устойчивая и надежная работа ракетно-космического комплекса зависит, прежде всего, от устойчивого и надежного электроснабжения, которое обеспечивается интегрированной системой электроснабжения ракетно-космического комплекса.

Под системой электроснабжения ракетно-космического комплекса понимается совокупность систем генерирования, преобразования, передачи и распределения электроэнергии, предназначенных для обеспечения

функционирования электрических приемников технических систем и технологического оборудования.

Определяющую роль в обеспечении надежного электроснабжения ракетно-космического комплекса играют их системы внешнего и внутреннего электроснабжения. Системы электроснабжения зданий (сооружений) и системы наземного электроснабжения специальными токами являются составными частями системы внутреннего электроснабжения.

Специфика технологического процесса подготовки ракеты-носителя к пуску отличает его от других производств (например, атомной энергетики, металлургии, химического производства). Эти отличия выражаются в: повышенной интенсификации всего технологического процесса по подготовке и проведению пуска ракетносителя; жесткой циклограмме функционирования технологического оборудования ракетно-космического комплекса, связанной с необходимостью пуска ракетносителя в строго определенное время; наличие взрывоопасных, в том числе, отравляющих топлив, используемых при заправке ракетносителя на старте; графике потребляемой мощности, который не является монотонным в течении года, а носит ярко выраженный ступенчатый, пиковый характер, характеризующийся относительно малым электропотреблением в режиме повседневных профилактических работ на ракетно-космическом комплексе (сотни кВт) и большой потребляемой мощностью (до десятков мВт) в режиме штатных работ по подготовке к пуску и пуску ракетносителя; высокой требуемой степени надежности разного рода технологических систем во время максимума нагрузки и недоступностью к ним обслуживающего персонала при проведении пуска ракетносителя; многорежимность функционирования наземного технологического оборудования, характеризующаяся периодичностью, цикличностью, высокой интенсивностью и продолжительностью штатных работ.

Указанные признаки выдвигают особые требования к электрическим потребителям технологического оборудования и системе электроснабжения технологического оборудования ракетно-космического комплекса.

**Особенности построения современных структур систем бесперебойного электроснабжения ракетно-космических комплексов наземного и шахтного базирования.** Специфика технологического процесса подготовки ракеты-носителя к пуску выдвигает жесткие требования к надежности работы технологического оборудования и, соответственно к работе системы электроснабжения технологического оборудования ракетно-космического комплекса [1 – 3].

Параметры электрической сети на выходе систем электропитания, устанавливаемые в рамках систем гарантированного электроснабжения, должны определяться требованиями к электроснабжению наземного технологического оборудования [4 – 5].

Построение систем гарантированного энергоснабжения для комплекса потребителей, территориально расположенных более чем на одном этаже, и, тем более, в нескольких зданиях, может производиться по различным схемам [6-9].

В настоящее время наибольшее распространение получили две основные структуры систем гарантированного электроснабжения: централизованная и распределенная (локализованная), см. рис. 1.



Рис. 1. Классификация систем гарантированного электроснабжения



Рис. 2. Централизованная структура системы гарантированного электроснабжения

Централизованная система содержит один источник бесперебойного питания, к которому подключены все ответственные потребители, см. рис. 2. В распределенной системе каждый потребитель (или группа локальных потребителей) питается от отдельного (локального) источника бесперебойного питания, см. рис. 3.

Основными преимуществами распределенной системы гарантированного электроснабжения являются: не требуется выделения отдельных специализированных рабочих мест при соответствующем выборе типов ИБП для их размещения; возможность реализации системы без переделки сетевой разводки, особенно при использовании "розеточных" ИБП; простота наращивания или изменения конфигурации; отказ одного из ИБП не оказывает влияния на электроснабжение других потребителей.

Недостатками распределенной системы являются: время автономной работы всей системы не является общим для всех нагрузок и при этом не может быть увеличено отключением нагрузки от других ИБП; низкая устойчивость при перегрузках, вызванных ошибочным подключением дополнительной нагрузки или коротким замыканием; суммарная стоимость ИБП малой мощности превышает стоимость централизованного ИБП равной мощности; снижение надежности системы гарантированного электроснабжения за счет увеличения количества ИБП, а также увеличение времени их обслуживания.

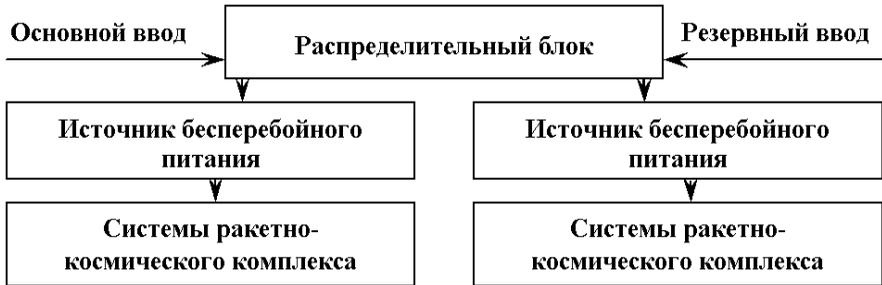


Рис. 3. Распределенная структура системы гарантированного электроснабжения

Преимуществами централизованной системы гарантированного электроснабжения являются: эффективность использования установленной мощности ИБП и емкости батарей; меньшая чувствительность к локальным перегрузкам; возможность увеличения времени автономной работы ИБП за счет отключения менее ответственных потребителей; увеличение надежности системы гарантированного электроснабжения за счет уменьшения количества ИБП, и соответственно уменьшения времени их обслуживания; более низкая, чем у распределенной системы, стоимость аппаратных средств централизованной системы при равной мощности.

Недостатком централизованной системы является более высокая по сравнению с распределенной системой вероятность локального отказа, выражающегося в обесточивании потребителей из-за неисправности разветвленной выходной сети электропитания или выхода из строя (связанного с возникновением короткого замыкания в цепи питания) одного из потребителей.

В чистом виде централизованная и распределенная (локализованная) системы гарантированного электроснабжения применяются достаточно редко. Использование централизованной системы целесообразно при концентрации оборудования, выполняющего единую задачу и состоящего из компонентов одного класса надежности и одинаковых по характеристикам энергопотребления.

Для устранения недостатков централизованной и распределенной системы на практике применяют двухуровневую систему, которая представляет собой комбинацию централизованной и распределенной системы, см. рис. 4. Для двухуровневой структуры, кроме установки одного ИБП большой мощности (или комплекса параллельно функционирующих ИБП, расположенных в одном месте, как правило, вблизи электрического ввода в здание), отдельные наиболее ответственные потребители защищаются с помощью локальных ИБП меньшей мощности. Целью такого резервирования является защита такого оборудования от обесточивания вследствие аварий кабельной сети внутри здания, вызванных локальными повреждениями, короткими замыканиями.



Рис. 4. Двухуровневая структура системы гарантированного электроснабжения

Для любого из вариантов построения системы гарантированного энергоснабжения на базе ИБП при необходимости обеспечения длительной работы в автономном режиме (т.е. при отключении входной электросети) такой комплекс дополняется одной или несколькими дизель-генераторными установками для обеспечения длительной автономной работы (в течение десятков часов и более). Такие генераторы комплектуются системой автоматического запуска и глушения с коммутацией нагрузки и могут быть дополнительно снабжены пультами удаленного управления и контроля.

Пропадание напряжения сети (или его значительное снижение) более чем на несколько секунд служит причиной запуска дизель-генератора (возможны три попытки старта). После запуска дизельного двигателя контакторы между основной сетью и нагрузкой размыкаются, и нагрузка переводится на генератор. Приборы мониторинга и аварийные сигналы дизель-генератора инициируются автоматически. После восстановления основной сети нагрузка переводится на нее. Генератор продолжает

некоторое время работать на холостом ходу (для охлаждения) и затем останавливается.

Современное развитие систем электроснабжения ракетно-космических комплексов выдвигает основополагающий принцип – электроснабжение потребителей особой группы I категории, за счет комплекса мероприятий по обеспечению надежного, бесперебойного электропитания технологического оборудования электроэнергией нормируемого качества, проводящейся в объеме всей системы электроснабжения комплекса.

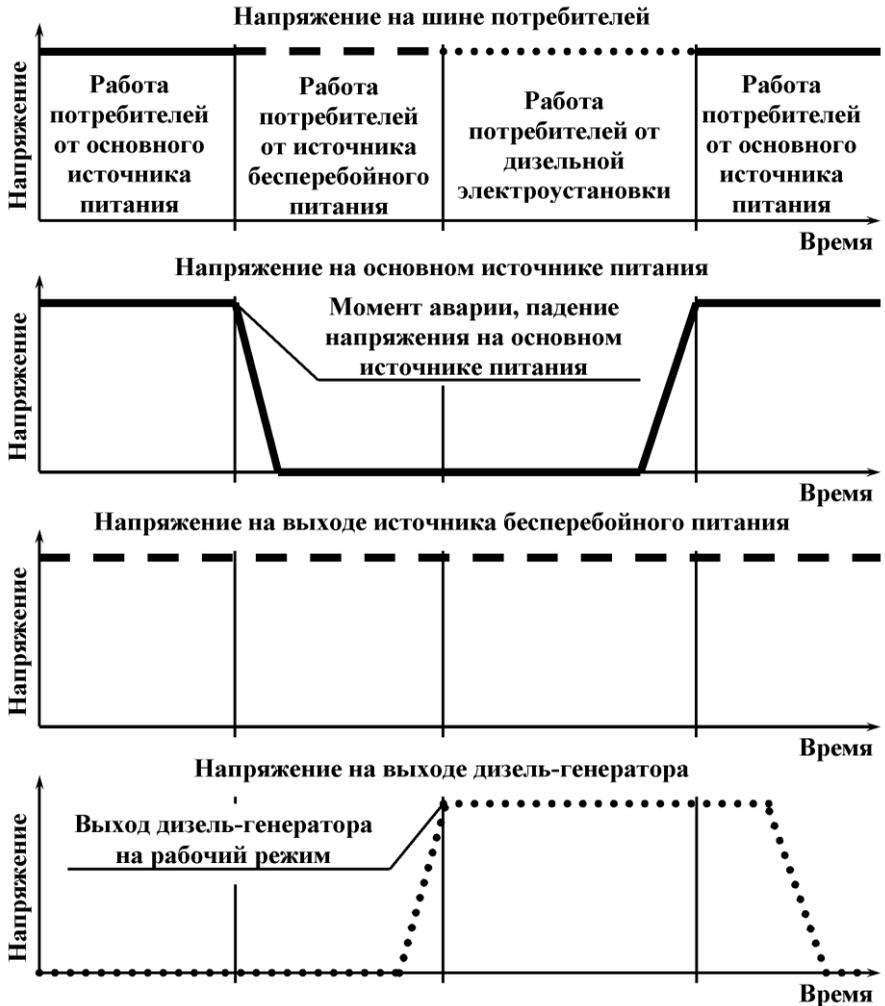


Рис. 5. Временная диаграмма работы комплекса источник «бесперебойного питания / дизельная электроустановка» для случая аварийного отключения и последующего восстановления основного электропитания

Диаграмма функционирования комплекса в случае аварийного отключения и последующего восстановления основного электроснабжения показаны на рис. 5.

**Преимущества использования систем гарантированного электроснабжения.** Система гарантированного энергоснабжения работает в переходных режимах таким образом, что в течение времени перехода питание приемников электрической энергии критичной группы осуществляется от аккумуляторной батареи, имеющейся в составе ИБП.

Наличие устройства автоматического ввода резерва и наличие двух ИБП в составе системы электроснабжения, обеспечивает выполнение принципа горячего резервирования.

Реальное время срабатывания устройства автоматического ввода резерва на порядок меньше времени включения дизельной энергоустановки, поэтому электропитание технологического оборудования категории 1 группы 1А осуществляется от блоков гарантированного питания, которые получают электроэнергию от двух параллельно включенных на общую нагрузку источников бесперебойного питания с 50 % загрузкой по мощности каждого.

ИБП позволяют исключить амплитудные и частотные искажения, работать в слабых и нестабильных сетях и эффективно подавлять импульсные помехи. При пропадании входного напряжения происходит переход на питание инвертора от аккумуляторных батарей с нулевым временем переключения без скачка амплитуды и фазы входного напряжения.

Благодаря, как минимум, двойному преобразованию, обеспечивается высокая изоляция выходного напряжения от влияния внешней среды и наоборот, что существенно для защиты информации от несанкционированного доступа со стороны сети общего назначения.

Время работы от аккумуляторной батареи определяет период, в течении которого ИБП обеспечивает электропитание защищаемые устройства. В общем случае время работы аккумуляторной батареи следует принимать равным, по крайней мере, десяткам минут, иначе гарантировать работу компонентов сети в течении периода времени, превышающего обычную продолжительность питания весьма проблематично.

Наличие автомата включения резерва и ИПБ в составе системы электроснабжения, обеспечивает выполнение принципа горячего резервирования, что отвечает требованиям к категорийности электроснабжения приемников электроэнергии, а использование для питания приемников критичной группы ИПБ, работающих в режиме "горячего" резервирования, позволило решить две взаимосвязанные задачи: обеспечение электромагнитной совместимости источников и приемников электрической энергии, включая качество электроэнергии и ее показатели и обеспечение надежности электроснабжения в соответствии с заданной категорийностью.

**Формирование и анализ структур и средств бесперебойного электроснабжения стартовых комплексов.** Система электроснабжения стартового комплекса предназначена для обеспечения электроэнергией требуемого вида и качества во всех режимах эксплуатации наземного вспомогательного электрического оборудования космического аппарата и технологического оборудования, участвующих в подготовке космического аппарата и ракеты-носителя на стартовой позиции.

Первичным источником электроэнергии для системы электроснабжения являются независимые источники электроснабжения.

Система электроснабжения стартового комплекса структурно состоит из следующих составных частей: дизель - генераторной установки; источника бесперебойного питания; коммутационно-распределительных устройств со встроенными преобразователями напряжения; системы контроля качества электроэнергии; комплекта кабелей внутрисистемных связей.

Система электроснабжения обеспечивает: прием и распределение электроэнергии по потребителям гарантированного электропитания; автоматическое включение резервного источника питания от дизель-генераторной установки при пропадании электроэнергии (или выходе параметров за пределы допусков) на обоих вводах системы внутреннего электроснабжения; защиту оборудования системы гарантированного электроснабжения стартового комплекса от токов короткого замыкания и токов перегрузок в потребителях.

Наземное вспомогательное электрическое оборудование космического аппарата и технологическое оборудование, участвующее в подготовке космического аппарата, являются потребителями электроэнергии 1 категории особой группы, в связи с этим, системы электроснабжения стартовых комплексов обязательно обеспечиваются источниками бесперебойного питания.

Системы бесперебойного электропитания это устройства, основной задачей которых является удержание параметров питающего напряжения большой группы оборудования в заданных пределах при отклонениях параметров напряжения электрической сети и, как следствие, защита электронных приборов по цепи питания.

Параметрами, заслуживающими отдельного рассмотрения, являются частота и форма питающего напряжения. Снижение частоты приводит к потерям при передаче электроэнергии при этом и отклонение формы напряжения от синусоидальной также приводит к потерям.

При снижении частоты до критической нижней отметки ситуация в сетях становится катастрофической. Процессы отключения при таких авариях становятся неуправляемыми, отключаются большие группы потребителей. Уменьшить потери и, соответственно, издержки потребителю позволяет применение отдельных ИБП или систем гарантированного электропитания.

Типичными для сетей являются следующие нарушения: провалы напряжения; отключение напряжения; броски напряжения и импульсные помехи; шумовые помехи.

Характерными признаками необходимости дополнительных мер защиты оборудования являются: ограниченная мощность ввода; расположение потребителей недалеко от мощных импульсных нагрузок; наличие в сети мощного промышленного оборудования; расположение оборудования в районах удаленных от местных подстанций; расположение оборудования в зоне с повышенной грозовой активностью.

Источники бесперебойного электропитания обеспечивают электроэнергией различных, по мощности, потребителей. Поэтому их разделяют на источники малой (до единиц киловатт), средней (от единиц до десятков киловатт) и большой мощности (до нескольких мегаватт).

ИБП подключается к сети переменного тока обычного качества и выполняет две функции: улучшения качества электрического питания; резервного источника питания.

Все выпускаемые ИБП по архитектуре построения можно разделить на два класса: резервные источники off-line, см. рис. 6, а, и источники с двойным преобразованием on-line, см. рис. 6, б.

Принцип построения резервных систем основан на том, что нагрузка изначально подключена к сети. В случае отключения или отклонения параметров сетевого напряжения от заданных, нагрузка переключается и запитывается от инвертора использующего энергию аккумуляторных батарей. Время старта инвертора и переключения нагрузки обычно не превышает 4-х миллисекунд.

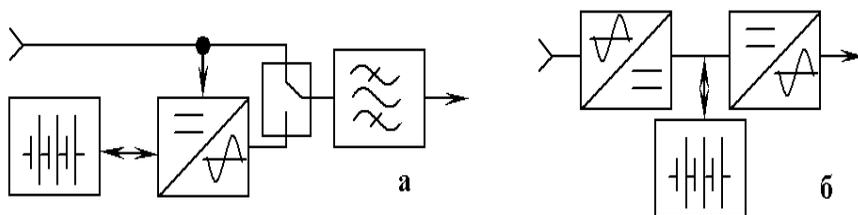


Рис. 6. Структурные схемы источников бесперебойного питания: а– резервных off-line источников, б– on-line источников с двойным преобразованием

Достоинствами off-line источников бесперебойного питания являются простота исполнения, малый вес и габариты, низкая стоимость, низкие эксплуатационные расходы и высокий КПД.

Недостатками off-line источников бесперебойного питания являются: инвертор не рассчитан на длительную работу; псевдосинусоидальный выход; фиксированное, малое «окно» по входному напряжению; неустойчивая работа в нестабильных сетях; как правило, отсутствие возможности существенно увеличить время автономной работы за счет дополнительных аккумуляторов; отсутствие возможности улучшения параметров входного напряжения; не работают в условиях ухода частоты сетевого напряжения и от дизель-генератора; не рассчитаны на работу с большими мощностями; отличное от нуля время переключения на аккумуляторные батареи в случае аварии сети; слабые возможности по управлению мощностью и нагрузкой. Самый большой недостаток резервных источников это непосредственное подключение нагрузки к сети. При этом помехи беспрепятственно попадают в нагрузку.

On-line источники с двойным преобразованием являются системами генерирующими собственное, стабильное по амплитуде и частоте, синусоидальное напряжение. Они работают по принципу двойного преобразования напряжения: переменное – постоянное – переменное.

Входное напряжение от сети переменного тока подается на выпрямитель, где оно преобразуется в напряжение постоянного тока. Это напряжение питает инвертор, а часть энергии используется для заряда аккумуляторных батарей. Постоянно работающий инвертор генерирует стабильное напряжение, параметры которого никак не связаны с параметрами входного напряжения.

On-line источники позволяют исключить амплитудные и частотные искажения, работать в слабых и нестабильных сетях и эффективно подавлять импульсные помехи.

При пропадании входного напряжения происходит переход на питание инвертора от аккумуляторных батарей с нулевым временем переключения без скачка амплитуды и фазы выходного напряжения. Таким образом, On-line источник представляет собой станцию эталонного синусоидального напряжения.

Выходная форма напряжения формируется самим источником и никоим образом не связана с формой напряжения в сети общего назначения. Благодаря двойному преобразованию обеспечивается высокая изоляция выходного напряжения от влияния внешней сети и наоборот, что существенно для защиты информации от несанкционированного доступа со стороны сети общего назначения.

Разновидностью Off-Line источников бесперебойного питания являются интерактивные источники бесперебойного питания Line-Interactive, см. рис. 7. Их отличительными признаками являются: фильтры, стабилизатор

напряжения, входной переключатель и автотрансформатор. В них усовершенствован инвертор и более развит процессор управления.

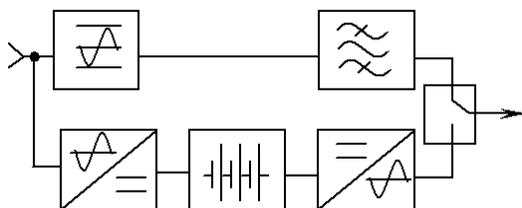


Рис. 7. Структурная схема интерактивного источника бесперебойного питания Line-Interactive

**Выводы.** В связи с тем, что технологическое оборудование современных стартовых комплексов, как правило, является электропотребителем I или II категории, в состав систем электроснабжения стартовых комплексов обязательно должны входить источники бесперебойного питания и системы гарантированного электроснабжения.

Ранее выбор структур и средств бесперебойного электроснабжения стартовых комплексов проходил, как правило, на интуитивном уровне, а в связи с неограниченностью в финансировании, ограничивался простым добавлением дополнительного источника электропитания, что на данный момент не является рациональным.

На основе проведенного обзора и анализа структур и средств бесперебойного электроснабжения авторами был создан алгоритм процесса формирования структур систем бесперебойного электроснабжения стартовых комплексов:

1. Определение исходных данных: циклограмма старта ракеты-носителя по потребителям стартового комплекса (потребление энергии наземным вспомогательным оборудованием космического аппарата, потребление энергии потребителей категории 1А, потребление энергии потребителей категории 1Б, потребление энергии потребителей II категории); граничные значения показателей качества электроэнергии; количество и виды источников электроэнергии, особенности местности и возможность использования различных источников энергии.

2. Определение видов и количества возможных нештатных ситуаций для конкретного типа стартового комплекса.

3. Составление схемы системы электроснабжения стартового комплекса (первого уровня) для обеспечения старта. Определение параметров

составляющих систему электроснабжения для обеспечения заданных значений параметров качества электроэнергии.

4. Учет исходных данных, определение уровней мощностей каждого элемента, входящего в систему электроснабжения стартового комплекса первого уровня.

5. Определение энергозатрат при штатном режиме работы системы электроснабжения.

6. Моделирование работы системы электроснабжения при возникновении нештатной ситуации.

7. Проверка условий обеспечения всех потребителей заданной категоричности по надежности и по количеству источников питания.

8. Оценка качества сформированных структур систем электроснабжения стартовых комплексов по основным показателям: качество электроэнергии, структурная надежность, стоимость разработки и изготовления, стоимость эксплуатации.

**Список литературы:** 1. *Бирюков, Г.П.* Основы построения ракетно-космических комплексов. / *Г.П. Бирюков, В.Н. Кобелев.* – М.: Издательство МАТИ им. К.Э. Циолковского, 2000. – 294 с. 2. Стартовое оборудование ракетно-космических комплексов/ под ред. *Б.К. Гранкина.* - Спб.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1994 – 286с. 3. *Кожухов, Н.С.* Комплексы наземного оборудования ракетной техники / *Н.С. Кожухов, В.Н. Соловьев* – М.: КБТМ, 1998.–182 с. 4. *Карташов В.М.* Основы проектирования систем наземного обеспечения / *В.М. Карташов, А.Г. Катков, В.В. Родченко* – М.: изд-во МАИ, 1998 – 312с. 5. ОТТ РВ - 11.1.18-88 Система общих технических требований к космическим средствам. Наземные системы электроснабжения. 6. *Безручко К.В.* Анализ систем электроснабжения стартовых комплексов современных ракет-носителей / *К.В. Безручко, А.О. Давидов, К.Н. Земляной, В.П. Фролов.* // Вісник двигунобудування. – 2008. – № 3. – С.41-44. 7. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. 8. *Земляной К.Н.* Выбор оптимальной структуры системы гарантированного электропитания наземного вспомогательного электрического оборудования КА / *К.Н. Земляной, Р.А. Андрюков, В.П. Фролов* // Вісник Дніпр. ун-ту. Серія: Ракетно-космічна техніка. – 2007. – № 9/2.–С. 19-20. 9. *Салкин И.В.* Совершенствование систем электроснабжения спецкомплексов (Системный анализ живучести и обоснования комплексных решений по базированию и обеспечению живучести спецкомплексов: Отчет о НИР) ВИКА им. А.Ф. Можайского; руководитель *Опарин С.Г. / И.В. Салкин* - С-Пб, – 1995. – 420 с.

*Надійшла до редакції 15.04.12*