

УДК 629.7.064.5

**В. С. РЕВА¹, К. Н. ЗЕМЛЯНОЙ¹, В. П. ФРОЛОВ¹,
О. В. ГАВРИЛОВ¹, К. В. БЕЗРУЧКО²**

¹ *Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»*

² *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ**

Приведены и проанализированы основные требования, предъявляемые к системам электроснабжения (СЭС) наземных комплексов космических ракетных комплексов, обозначена актуальность вопроса надежности и устойчивости. Выделены особенности режимов работы систем электроснабжения с использованием автономного источника питания и приведена временная диаграмма работы комплекса от автономного источника питания (АИП) для случая аварийного отключения и последующего восстановления электроснабжения. Построена математическая модель автономного источника питания, с помощью которой возможно осуществить выбор и мощность АИП. Построение математических моделей, определение особенностей работы СЭС с использованием АИП, обеспечение комплекса мероприятий по повышению устойчивости работы системы с АИП позволяет повысить надежность и безотказность работы систем электроснабжения.

Ключевые слова: надежность, структура, устойчивость работы, система электроснабжения, автономный источник питания, качество.

1. Требования, предъявляемые к системам электроснабжения

Системы электроснабжения наземных комплексов (СЭС НК) существующих космических ракетных комплексов были спроектированы для питания НТО, которое в настоящее время имеет совершенно другие электрические и эксплуатационные характеристики.

В настоящее время снижение общей стоимости создания КРК является одной из главных задач обеспечивающих создание конкурентоспособной цены запуска КА.

Таким образом, создание современной конкурентоспособной СЭС НК невозможно без улучшения ее структуры, на проектном этапе, исходя из предъявляемых требований к электроснабжению потребителей и циклограммы их работы в процессе подготовки и запуска РКН.

Создание новой техники, в том числе систем электроснабжения, начинается с формирования требований, предъявляемых к ней. Общие требования к системам электроснабжения должны явиться результатом решения задачи более высокого уровня [1].

Основные требования, предъявляемые к системам электроснабжения приведены в таблице 1. Среди прочего, можно выделить требования по назначению системы, надежности, безопасности.

Таблица 1

Требования к СЭС

Основные требования, предъявляемые к проектируемым системам электроснабжения:
- назначению;
- живучести и стойкости к внешним воздействиям;
- надежности;
- эргономике и обитаемости;
- эксплуатации, удобству технического обслуживания;
- транспортабельности;
- безопасности;
- стандартизации и унификации;
- конструктивным решениям;
- технико-экономическим показателям;
- метрологическому обеспечению;
- математическому, программному и информационному обеспечению;
- требование к консервации, упаковке и маркировке;
- требования к электромагнитной совместимости.

В рамках информационного обеспечения моделей осуществляется конкретизация функциональных зависимостей полученных требований, полученных при анализе выявленных связей и структур. В по-

следствии, после конкретизации зависимостей каждого из требований, возможно построение алгоритмов для реализации заданных требований.

Одним из главных требований является требование по надежности, в котором предусмотрено резервирование источников питания для системы электроснабжения за счет использования трех независимых вводов.

Также, необходимо оптимизировать выбора технологии работы источников питания основываясь на опыте работы других КРК (СЭС) или используя математическое моделирование [2]. Основными режимами работы системы электроснабжения являются: работы в период подготовки и пуска РКН, при отмене пуска, в межпусковой период, при проведении ГТО. Для каждого из режимов работы СЭС необходимо обеспечивать разную степень надежности питания потребителей путем использования различных источников электроэнергии [3].

2. Актуальность и анализ существующих систем электроснабжения

Актуальность исследований устойчивости работы систем электроснабжения наземных комплексов с использованием автономных источников питания энергосистемой обусловлена тем, что во мно-

гих странах базирования создаваемых КРК отсутствует возможность электроснабжения от энергосистемы или она достаточно неустойчива и не может предоставить требуемую мощность.

Был проведен анализ существующих систем электроснабжения, основные результаты которого сведены в таблицу 2, а именно: питающие номиналы, напряжений, мощности комплексов, обеспечение внешней энергосистемой и дизельными электростанциями.

В результате проведенного анализа были выделены основные достоинства и недостатки. К недостаткам можно отнести:

- структуры систем электроснабжения не соответствует современным требованиям по надежности электроснабжения потребителей;

- возможны перерывы и выход параметров качества электроэнергии за допустимые пределы в электроснабжении технологического оборудования;

- отсутствие автоматизации работы системы, в том числе контроля параметров качества электроэнергии;

- избыточность некоторых составных частей системы электроснабжения, а также старая элементная база.

Результат анализа показал актуальность вопросов надежности и устойчивости работы систем электроснабжения наземных комплексов с использованием автономных источников питания.

Таблица 2

Анализ существующих СЭС КРК

Космический ракетный комплекс (космодром)	Источники электроснабжения		Характеристики электроснабжения	
	внешние	внутренние	внешние	внутренние
КРК «Зенит-2», «Зенит-3SLБ» («Байконур»)	ОЭС "Юг" ВЛ-220 кВ, ОЭС "Север" ВЛ-220 кВ	ГТЭЛЭП-72	~6(10)кВ, 50Гц	~220/380В, 50Гц, = 28,5V
КРК «Днепр» («Байконур»)		2 ДЭС по 500 кВт; Для СГЭП СП ДЭС140 кВт		~220/380В, 50Гц
Площадка 31 («Байконур»)		ДЭС 200 кВт;		~220/380В, 50Гц, ~200/300В, 60Гц,
КРК «Циклон-2» («Плесецк»)	Госсеть «Архангельскэнерго»	ДЭС2000 кВт	~6 (10)кВ, 50Гц,	~220/380В, 50Гц, = 28,5V
КРК «Циклон-4» («Алькантара»)	Госсеть «СЕМАР»	ДЭС1000 кВт (5шт).	~13,8кВ, 60Гц,	~220/380В, 60Гц, = 28,5V
КРК «Морской Старт» (SeaLunch)		ДЭС 4шт по 2,5 МВт.	~6кВ, 50(60Гц)	~220/380В, 50(60Гц) = 28,5V
Космодром «Восточный»	Подстанции: 220 кВ «Ледяная»; 500кВ «Амурская»	ДЭС общей мощностью 6000 кВт	~6(10) кВ, 50Гц	~220/380В, 50Гц, = 28,5V

3. Особенности работы систем электроснабжения с использованием автономного источника питания

На рис. 1 показано, как изменяется напряжение на выходе генератора при резком увеличении нагрузки. При подключении нагрузки неизбежные «просадки» напряжения, которые составляют 15-20% от номинального напряжения. И так, при увеличении нагрузки напряжение и/или частота АИП может выйти за допустимые пределы. Входящие в состав СЭС источники бесперебойного питания воспримут это как пропадание сети, и временно работа системы будет от ИБП.

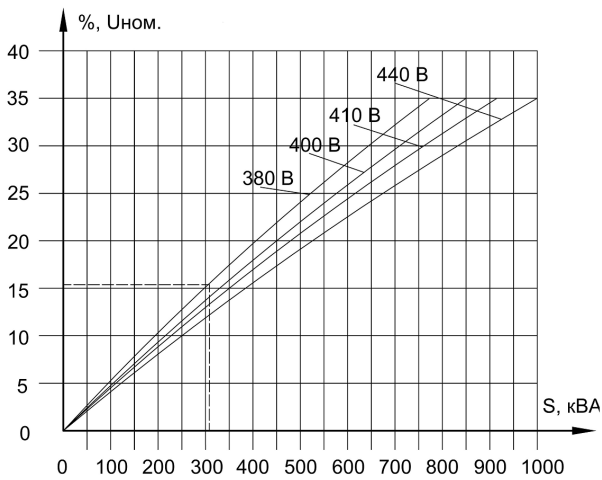


Рис. 1. Зависимость напряжения на выходе генератора при резком увеличении нагрузки

При внедрении в систему электроснабжения фильтрующих элементов, аппаратуры плавного пуска двигателей, компенсирующих устройств реактивных мощностей на протяжении времени пуска мощных электропотребителей восстановит номинальное напряжение и частоту.

Современное развитие систем электроснабжения ракетно-космических комплексов выдвигает основополагающий принцип электроснабжения потребителей особой группы, за счет комплекса мероприятий по обеспечению надежного, бесперебойного электропитания технологического оборудования электроэнергией нормированного качества, с помощью взаимодействия АИП и ИБП (рис.2).

4. Создание математических моделей АИП

Исследование альтернатив и соответствующих им показателей производится на моделях. При исследовании систем электроснабжения с использованием автономных источников питания возникает

необходимость привлечения не одной модели, а их комплекса, и проведения с использованием этих моделей многокритериального анализа и синтеза [2].

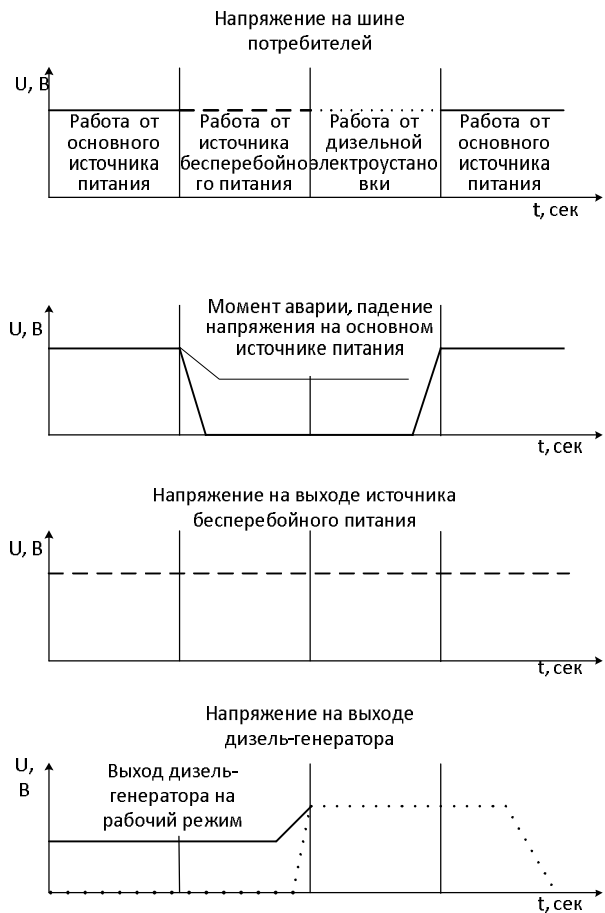


Рис. 2. Временная диаграмма работы комплекса ИБП/АИП для случая аварийного отключения и последующего восстановления электроснабжения

Структура математической модели АИП имеет следующий вид:



- где: N_d – мощность дизельного двигателя АИП;
- M_d – крутящий момент дизельного двигателя АИП;
- n – обороты дизельного двигателя АИП;
- $P_{АИП}$ – мощность генератора АИП;
- $U_{АИП}$ – напряжение генератора АИП;
- $\tau_{АИП}$ – время работы генератора АИП.

Автономный источник питания состоит из двигателя внутреннего сгорания и синхронного генератора (рис. 3).

Математическая модель двигателя внутреннего сгорания представлена на рисунке 4. Скоростная характеристика двигателя внутреннего сгорания может быть построена аналитически по эмпириче-

ским формулам С. Р. Лейдермана, если для ряда режимов по числу оборотов произведен тепловой расчет [2].

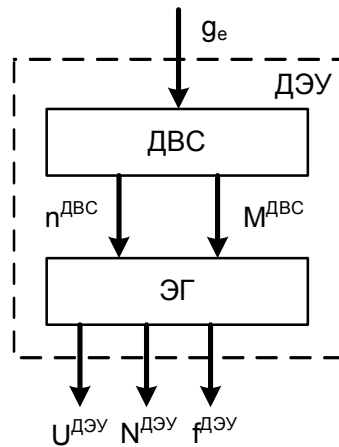


Рис. 3 Структурная схема дизельной энергоустановки



Рис. 4. Структура математической модели АИП

Математическая модель АИП в итоге принимает вид:

- математическая модель двигателя внутреннего сгорания:

внешняя характеристика

$$N_e = N_e^{\max} \left(A \frac{n}{n_e} + B \frac{n^2}{n_e^2} + C_1 \frac{n^2}{n_e^3} \right),$$

расход топлива

$$g_e = g_e^{\max} \left(A_1 - B_1 \frac{n}{n_e} + C_1 \frac{n^2}{n_e^2} \right);$$

крутящий момент

$$M_{кр} = 9950 \frac{N_e}{n};$$

часовой расход топлива

$$G_T = g_e N_e;$$

- математическая модель синхронного электрогенератора:

полное сопротивление

$$Z_H = R_H - jX_u Z_H \cdot e^{+\arctg \frac{X_H}{R_H}} = Z \cdot e^{j\Phi_H};$$

падение напряжения

$$\Delta U_H = \frac{U_o - U_H}{U_H} \cdot 100 = \frac{E_o - E_H}{E_H} \cdot 100;$$

частота

$$f = \frac{p \cdot \Omega_Z}{2\pi};$$

мощность

$$N = U^2 / Z_H.$$

Выводы

Во многих странах базирования создаваемых КРК отсутствует возможность электроснабжения от энергосистемы или она достаточно неустойчива и не может предоставить требуемую мощность.

Построение математических моделей АИП, проработка вопроса совместной работы внешних источников питания, автономных источников питания и источников бесперебойного питания, анализ работы комплекса от АИП в случае аварийного отключения обеспечит надежность и устойчивость работы систем электроснабжения наземных комплексов.

Литература

1. Бирюков, Г. П. Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов [Текст] / Г. П. Бирюков, Ю. Ф. Кукушкин, А. В. Торпачев. – М. : МАИ, 2002. – 264 с.
2. Обухов, С. Г. Математическое моделирование в системах электроснабжения: учебное пособие [Текст] / С. Г. Обухов. – Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2014. – 84 с.
3. Рева, В. С. Разработка технологического графика работы источников питания из состава системы электроснабжения наземного комплекса [Текст] / В. С. Рева // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 7 (94). – С. 137-141.

References

1. Biryukov, G. P., Kukushkin, Yu. F., Torpachev, A. V. *Osnovy obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti startovykh kompleksov* [Bases of launch system reliability and safety]. Moscow, MAI Publ., 2002. 264 p.
2. Obuhov, S. G. *Matematicheskoe modelirovanie v sistemah elektrosnabgeniya : uchebnoye posobiye*. [Mathematical modelling in electric supply systems] Tomsk, Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta Publ., 2014. 84 p.
3. Reva, V. S. *Razrabotka tehnologicheskogo grafika raboty istochnikov pitaniya iz sostava sistemye elektrosnabgeniya nazemnogo kompleksa* [Development of the technological schedule for electric sources of on-ground launch system]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2012, no. 7 (94), pp.137-141.

Поступила в редакцию 01.06.2016, рассмотрена на редколлегии 12.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л. И. Кныш, Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, Днепр.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

В. С. Рева, К. М. Земляний, В. П. Фролов, О. В. Гаврилов, К. В. Безручко

Наведено та проаналізовано основні вимоги, що пред'являються до систем електропостачання (СЕП) наземних комплексів космічних ракетних комплексів, розглянуто актуальність питання надійності та стійкості. Виділено особливості режимів роботи систем електропостачання з використанням автономного джерела живлення і приведена тимчасова діаграма роботи комплексу від автономного джерела живлення (АДЖ) для випадку аварійного відключення і подальшого відновлення електропостачання. Побудовано математичну модель автономного джерела живлення, за допомогою якої можливо здійснити вибір і потужність АДЖ. Побудова математичних моделей, визначення особливостей роботи СЕП з використанням АДЖ, забезпечення комплексу заходів щодо підвищення стійкості роботи системи з АДЖ дозволяє підвищити надійність і безвідмовність роботи систем електропостачання.

Ключові слова: надійність, структура, стійкість роботи, система електропостачання, автономне джерело живлення, якість.

RELIABILITY AND OPERATIONAL STABILITY PROVIDING FOR GROUND-BASED LAUNCH COMPLEX USING INDEPENDENT SUPPLY SOURCES

V. S. Reva, K. N. Zemlyany, V. P. Frolov, O. V. Gavrillov, K. V. Bezruchko

The basic requirements for power supply systems (PSS) of ground complexes of space rocket complexes are given and analysed, the urgency of the issue of reliability and stability is indicated. The features of the operation modes of power supply systems using an autonomous power supply are shown and a time diagram of the operation of the complex from an autonomous power supply (APS) for an emergency shutdown and subsequent recovery of power supply is given. A mathematical model of an autonomous power source is constructed, with the help of which it is possible to realize the choice and power of the APS. The construction of mathematical models, the determination of the peculiarities of the PSS operation with the use of APS, the provision of a set of measures to increase the stability of the system with APS allows to increase the reliability and trouble-free operation of power supply systems.

Keywords: reliability, structure, stability of work, power supply system, autonomous power source, quality.

Рева Вадим Сергеевич – начальник группы, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. Янгеля», Днепр, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Земляной Константин Николаевич – начальник отдела, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. Янгеля», Днепр, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Фролов Виктор Петрович – канд. техн. наук, заместитель начальника комплекса, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. Янгеля», Днепр, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Гаврилов Олег Вячеславович – инженер, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. Янгеля», Днепр, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com

Безручко Константин Васильевич – д-р техн. наук, проф., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков Украина, e-mail: k.bezruchko@khai.edu

Reva Vadym Sergiovich – Head of the group, “Yuzhnoye” SDO, Dnipro, Ukraine, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Zemlyany Kostyantyn Nikolaiovich – Head of the department, “Yuzhnoye” SDO, Dnipro, Ukraine, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Frolov Victor Petrovich – Candidate of Technical Science, deputy head of the complex, “Yuzhnoye” SDO, Dnipro, Ukraine, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Gavrillov Oleg Vyacheslavovich – Engineer, “Yuzhnoye” SDO, Dnipro, Ukraine, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Bezruchko Konstantin Vasilievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: k.bezruchko@khai.edu.