

УДК 621.7.064.52

К.В. БЕЗРУЧКО¹, А.О. ДАВИДОВ¹, В.П. ФРОЛОВ²¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина

ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ СОВРЕМЕННЫХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

В данной работе на основе системотехнического подхода предлагается достаточно простая технология построения математических моделей систем электроснабжения стартовых комплексов современных ракет-носителей. Приведены функциональные зависимости параметров отдельных агрегатов и частей систем электроснабжения, составляющие в совокупности математические модели систем электроснабжения стартового комплекса. Показана возможность автоматизации процесса построения моделей систем электроснабжения различных структур. Предложенная технология построения математических моделей систем электроснабжения стартовых комплексов дает возможность выполнить анализ эффективности большого перечня возможных структур систем электроснабжения и широко использовать методы математического моделирования при проектировании, испытаниях и эксплуатации стартовых комплексов ракет-носителей.

Ключевые слова: стартовый комплекс, ракета-носитель, система электроснабжения, дизель-электростанция, источник бесперебойного питания, трансформатор, математическая модель.

Введение

Жизнеобеспечение стартовых комплексов (СК) современных ракет-носителей (РН) напрямую зависит от работоспособности систем электроснабжения (СЭС) данных комплексов.

Огромное разнообразие структур СЭС СК затрудняет анализ их эффективности, поиск возможных путей модернизации и усовершенствования таких СЭС.

В настоящее время системы электроснабжения СК могут быть разделены на три группы:

- новые СЭС для новых СК строящихся космодромов;
- усовершенствованные системы электроснабжения стартовых комплексов космодромов, созданных 25 – 30 лет назад;
- модернизированные СЭС СК для ракет, используемых по конверсии на базе боевой техники [1].

Анализ эффективности, проектирование, испытания и надежная эксплуатация указанного многообразия структур СЭС СК могут быть выполнены методами математического моделирования, основу которых составляет простая технология построения и использования математической модели СЭС заданной структуры. Данная работа посвящена этой теме.

1. Концепция построения моделей

Основная концепция разработки простой технологии построения математических моделей может быть сведена к созданию эффективных моделирующих средств СЭС и ее составных частей (рис. 1), основанных на реализации известных принципов системного анализа и синтеза [2].

Блок-схема алгоритма рассматриваемой концепции, представленная на рис. 1, отражает последовательность операций: задание исходных условий моделирования – декомпозицию – информационное обеспечение – синтез модели – проверка адекватности и уточнение (идентификация) модели [2].

На соответствующей стадии проектирования формулируются проектная (или испытательная) задача или класс задачи на базе этого – формулируются условия моделирования: устанавливаются основные параметры СЭС, структурная схема СЭС, условия эксплуатации и др.

Затем вступает в силу схема системного анализа. В качестве одной из систем СК выделяется СЭС и определяются ее внешние и внутренние связи, отражающие заданные условия эксплуатации и устанавливается уровень достаточной информативности модели. В качестве следующего шага, применяя метод декомпозиции в соответствии с заданной структурной схемой, определяется уровень декомпозиции системы, соответствующий приятному

уровню достаточной информативности модели. Затем строятся, конкретизируются и проверяются на адекватность функциональные связи параметров агрегатов (узлов) СЭС, которые на выбранном уровне декомпозиции в совокупности образуют математическую модель СЭС.

2. Обобщенная схема системы электроснабжения стартовых комплексов РН

Решение задачи построения структуры математической модели системы электроснабжения стартового комплекса можно проиллюстрировать с использованием обобщенной структурной схемы СЭС СК, приведенной на рис. 2.

Основные агрегаты и узлы системы энергоснабжения стартовых комплексов функционально связаны между собой и в процессе работы системы достаточно сложно взаимодействуют друг с другом. При проектировании того или иного агрегата эти взаимодействия следует учитывать и рассматривать систему как сложную техническую систему.

3. Декомпозиция СЭС и формирование структуры функциональных связей агрегатов (узлов) СЭС СК РН

Схема декомпозиции СЭС СК РН в соответствии со структурой СЭС, приведенной на рис. 2, представлена на рис. 3.

После декомпозиции обобщенной схемы системы энергоснабжения стартовых комплексов (рис. 3), определяем основные составляющие системы на уровне агрегатов (узлов) и формируем структуру функциональных связей агрегатов и узлов (рис. 4).

Согласно схеме разработки структур моделей (рис. 1) определяются внешние для системы электроснабжения функциональные связи (блок 2 на рис. 1). Внешними функциональными связями для обобщенной системы энергоснабжения стартовых комплексов являются выражения для напряжения (U) и мощности (N) внешней стационарной энергосистемы.

Также внешними функциональными связями необходимо считать связь с системами стартового комплекса – условиями обеспечения электроэнергией технологических систем (ТС), технологического оборудования (ТО) и наземного вспомогательного оборудования (ТВО) космического аппарата (КА).

В итоге система уравнений, описывающая внешние связи системы энергоснабжения, может быть представлена в таком общем виде:



Рис. 1. Блок-схема концепции построения математических моделей систем электроснабжения стартовых комплексов

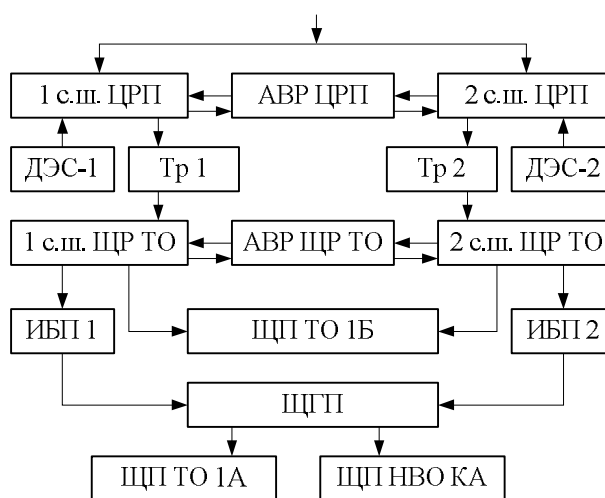


Рис. 2. Обобщенная структурная схема системы внутреннего электроснабжения стартового комплекса:

ЦРП – центральный распределительный пункт; АВР – автомат включения резерва; ДЭС – дизельная электрическая станция; ТР – трансформатор; ЩР ТО – щит распределения электроэнергии для технологического оборудования; ЩР ТС – щит распределения электроэнергии технологических систем; С.Ш. – секция шин; ИБП – источник бесперебойного питания; ЩП ТО – щит питания технологического оборудования; ЩГП – щит гарантированного питания; НВО – наземное вспомогательное оборудование

$$\left. \begin{aligned} U_{TO} &= f(U_1, U_2, N_1, N_2, t); \\ U_{НВОКА} &= f(U_1, U_2, N_1, N_2, t); \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{TC} &= f(U_1, U_2, N_1, N_2, t); \\ U_{НВОКА} &= f(U_1, U_2, N_1, N_2, t); \end{aligned} \right\} (2)$$

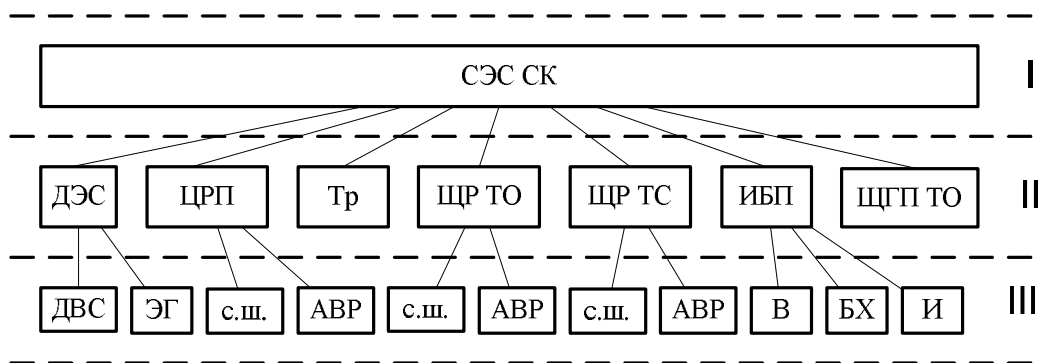


Рис. 3. Схема декомпозиции системы внутреннего электроснабжения стартового комплекса на агрегаты и узлы.: I – уровень системы; II – уровень агрегатов; III – уровень узлов; ДВС – двигатель внутреннего сгорания (дизель); ЭГ – электрогенератор; БХ – батарея электрохимическая

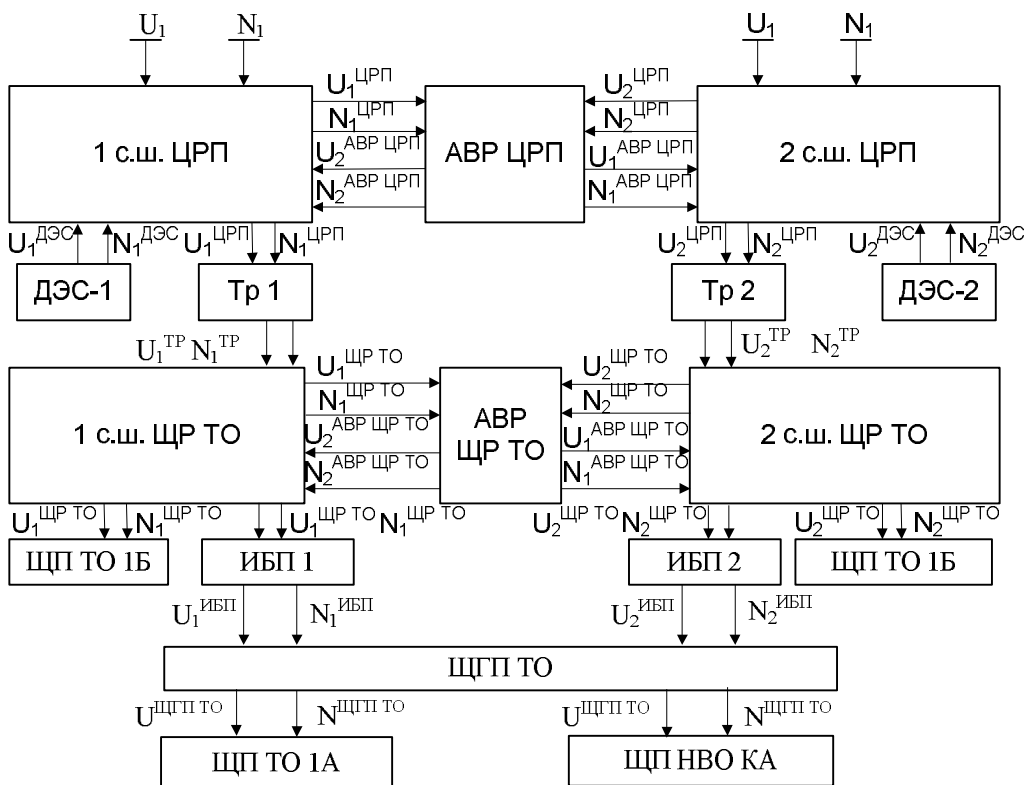


Рис. 4. Структура функциональных связей агрегатов систем внутреннего электроснабжения стартового комплекса

4. Пример построения структуры математической модели СЭС СК РН обобщенной схемы

Учитывая функциональные связи между агрегатами и узлами СЭС и в соответствии со структурой функциональных связей, приведенной на рис.

4, получим функциональные связи параметров агрегатов, образующих в совокупности развитую структуру математической модели СЭС на уровне агрегатов:

а) центральный распределительный пункт (ЦРП):

$$U_1^{ЦРП} = U_1 + U_1^{АВР};$$

$$U_1^{ABP} = \begin{cases} 0, \text{ при } U_1 = \text{norm}; \\ U_2, \text{ при } U_1 \neq \text{norm}; \end{cases} \quad N_1^{TC} = \begin{cases} N_1^{\text{ЩРТС}}, \text{ при } N_1^{\text{ЩРТС}} = \text{norm}; \\ N_2^{\text{ЩРТС}}, \text{ при } N_2^{\text{ЩРТС}} = \text{norm}; \end{cases} \quad (5)$$

$$N_1^{\text{ЦРП}} = N_1 + N_1^{ABP};$$

$$U_2^{ABP} = \begin{cases} 0, \text{ при } U_2 = \text{norm}; \\ U_1, \text{ при } U_2 \neq \text{norm}; \end{cases} \quad U_2^{\text{ЦРП}} = U_2 + U_2^{ABP};$$

$$N_1^{ABP} = \begin{cases} 0, \text{ при } N_1 = \text{norm}; \\ N_2, \text{ при } N_1 \neq \text{norm}; \end{cases} \quad N_2^{\text{ЦРП}} = N_2 + N_2^{ABP};$$

$$N_2^{ABP} = \begin{cases} 0, \text{ при } N_2 = \text{norm}; \\ N_1, \text{ при } N_2 \neq \text{norm}; \end{cases} \quad (3)$$

б) трансформатор (Тр):

$$U_1^{\text{ЦРП}} = \frac{W_1}{W_2} \cdot U_1^{\text{Тр}};$$

$$I_1^{\text{ЦРП}} = \frac{W_1}{W_2} \cdot I_1^{\text{Тр}};$$

$$N_1^{\text{ЦРП}} = \frac{W_2}{W_1} \cdot N_1^{\text{Тр}};$$

$$U_2^{\text{ЦРП}} = \frac{W_1}{W_2} \cdot U_2^{\text{Тр}};$$

$$I_2^{\text{ЦРП}} = \frac{W_2}{W_1} \cdot I_2^{\text{Тр}};$$

$$N_2^{\text{ЦРП}} = \frac{W_2}{W_1} \cdot N_2^{\text{Тр}}. \quad (4)$$

в) распределительный щит технологического оборудования и систем (ЩР ТО, ТС):

$$U_1^{\text{ЩРТО}} = U_1^{\text{Тр}} + U_{1ABP}^{\text{ГРЩ}};$$

$$U_2^{\text{ЩРТО}} = U_2^{\text{Тр}} + U_{2ABP}^{\text{ГРЩ}};$$

$$N_1^{\text{ЩРТО}} = N_1^{\text{Тр}} + N_{1ABP}^{\text{ГРЩ}};$$

$$N_2^{\text{ЩРТО}} = N_2^{\text{Тр}} + N_{2ABP}^{\text{ГРЩ}};$$

$$U_{1ABP}^{\text{ГРЩ}} = \begin{cases} 0, \text{ при } U_1^{\text{Тр}} = \text{norm}; \\ U_2^{\text{Тр}}, \text{ при } U_1^{\text{Тр}} \neq \text{norm}; \end{cases}$$

$$U_{2ABP}^{\text{ГРЩ}} = \begin{cases} 0, \text{ при } U_2^{\text{Тр}} = \text{norm}; \\ U_1^{\text{Тр}}, \text{ при } U_2^{\text{Тр}} \neq \text{norm}; \end{cases}$$

$$N_{1ABP}^{\text{ГРЩ}} = \begin{cases} 0, \text{ при } N_1^{\text{Тр}} = \text{norm}; \\ U_2^{\text{Тр}}, \text{ при } N_1^{\text{Тр}} \neq \text{norm}; \end{cases}$$

$$N_{2ABP}^{\text{ГРЩ}} = \begin{cases} 0, \text{ при } N_2^{\text{Тр}} = \text{norm}; \\ N_1^{\text{Тр}}, \text{ при } N_2^{\text{Тр}} \neq \text{norm}; \end{cases}$$

$$U^{\text{ТС}} = \begin{cases} U_1^{\text{ЩРТС}}, \text{ при } U_1^{\text{ЩРТС}} = \text{norm}; \\ U_2^{\text{ЩРТС}}, \text{ при } U_2^{\text{ЩРТС}} = \text{norm}; \end{cases}$$

г) щит питания технологического оборудования (ЩП ТО) категории 1Б:

$$U_{1Б}^{\text{ТО}} = \begin{cases} U_1^{\text{ЩРТО}}, \text{ при } U_1^{\text{ЩРТО}} = \text{norm}; \\ U_2^{\text{ЩРТО}}, \text{ при } U_2^{\text{ЩРТО}} = \text{norm}; \end{cases}$$

$$N_{1Б}^{\text{ТО}} = \begin{cases} N_1^{\text{ЩРТО}}, \text{ при } N_1^{\text{ЩРТО}} = \text{norm}; \\ N_2^{\text{ЩРТО}}, \text{ при } N_2^{\text{ЩРТО}} = \text{norm}; \end{cases} \quad (6)$$

д) источник бесперебойного питания (ИБП):

$$U_1^{\text{ИБП}} = U_p^{\text{1AK}} \cdot K_{\text{инв}};$$

$$U_3^{\text{1AK}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}m_2} \cdot \frac{U_1^{\text{ЩРТО}}}{\sin \frac{\pi}{m_2}};$$

$$I_3^{\text{1AK}} = 0,476 \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{N_1^{\text{ЩРТО}}}{U_1^{\text{ЩРТО}}};$$

$$U_2^{\text{ИБП}} = U_p^{\text{2AK}} \cdot K_{\text{инв}};$$

$$U_3^{\text{2AK}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}m_2} \cdot \frac{U_2^{\text{ЩРТО}}}{\sin \frac{\pi}{m_2}};$$

$$I_3^{\text{2AK}} = 0,476 \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{N_2^{\text{ЩРТО}}}{U_2^{\text{ЩРТО}}};$$

$$N_1^{\text{ИБП}} = U_p^{\text{1AK}} \cdot I_p^{\text{1AK}};$$

$$N_{21}^{\text{ИБП}} = U_p^{\text{2AK}} \cdot I_p^{\text{2AK}};$$

$$\tau_p^{\text{2ИБП}} = \frac{Q^{\text{2AK}}}{I_p^{\text{2AK}}};$$

$$\tau_p^{\text{1ИБП}} = \frac{Q^{\text{1AK}}}{I_p^{\text{1AK}}}. \quad (7)$$

е) щит гарантированного питания технологического оборудования (ЩГП ТО):

$$U^{\text{ЩГПТО}} = \begin{cases} U_1^{\text{ИБП}}, \text{ при } U_1^{\text{ИБП}} = \text{norm}; \\ U_2^{\text{ИБП}}, \text{ при } U_2^{\text{ИБП}} = \text{norm}; \end{cases}$$

$$N^{\text{ЩГПТО}} = \begin{cases} N_1^{\text{ИБП}}, \text{ при } N_1^{\text{ИБП}} = \text{norm}; \\ N_2^{\text{ИБП}}, \text{ при } N_2^{\text{ИБП}} = \text{norm}; \end{cases} \quad (8)$$

ж) щит питания наземного вспомогательного оборудования космического аппарата (ЩП НВО КА):

$$U^{\text{НВОКА}} = U^{\text{ЩГПТО}};$$

$$N^{\text{НВОКА}} = N^{\text{ЩГПТО}}. \quad (9)$$

Структуры математических моделей СЭС, подобные (1) – (9), совместно с базовыми математическими моделями агрегатов СЭС могут строиться по автоматизированному алгоритму (рис. 5).

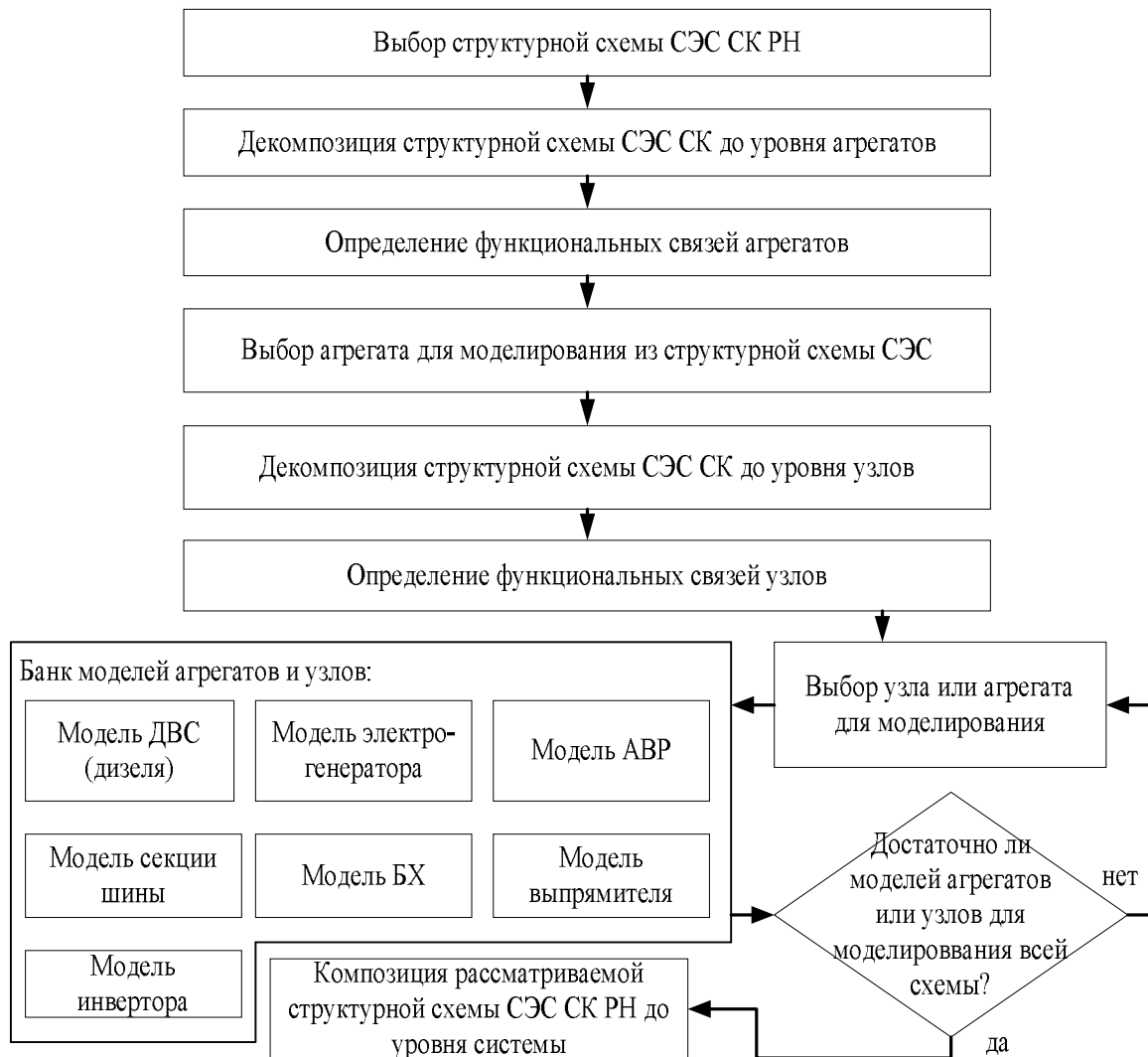


Рис. 5. Блок-схема автоматического построения математической модели системы электроснабжения стартовых комплексов ракет-носителей

Заключение

Предложенная технология построения математических моделей СЭС СК современных РН дает возможность:

- достаточно просто построить математические модели различных структурных СЭС СК на основе современных достижений электроэнергетики;
- автоматизировать процесс построения разнообразных структур системы электроснабжения стартовых комплексов;
- выполнить анализ эффективности (по различным критериям) большого перечня возможных структур СЭС СК;

– широко использовать методы математического моделирования при проектировании, испытаниях и эксплуатации СЭС стартовых комплексов РН.

Литература

1. Киселев А.Н. Космонавтика на рубеже тысячелетий. Итого и перспективы / А.Н. Киселев, А.А. Медведев, В.А. Меньшиков. – М.: Машиностроение, Полет, 2002. – 734 с.
2. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование / К.В. Безручко, Н.В. Белан, В.И. Драновский и др. – Х.: ХАИ, 2000. – 515 с.

Поступила в редакцию 21.05.2009

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ
СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАРТОВИХ КОМПЛЕКСІВ
СУЧАСНИХ РАКЕТ-НОСІЇВ**

К.В. Безручко, А.О. Давідов, В.П. Фролов

У даній роботі на основі системотехнічного підходу пропонується досить проста технологія побудови математичних моделей СЕЗ СК РН. Наведено функціональні залежності параметрів окремих агрегатів та частин СЕЗ, які складають в сукупності математичні моделі СЕЗ стартового комплексу. Показано можливість автоматизації процесу побудови моделей СЕЗ різних структур. Запропонована технологія побудови математичних моделей систем електрозабезпечення стартових комплексів дає можливість виконати аналіз ефективності великого переліку можливих структур систем електропостачання і широко використовувати методи математичного моделювання при проектуванні, випробуваннях і експлуатації стартових комплексів ракет-носіїв.

Ключеві слова: стартовий комплекс, ракета-носій, система електрозабезпечення, дизель-електростанція, джерело безперебійного живлення, трансформатор, математична модель.

**TECHNOLOGY OF MAKING OF MATHEMATICAL MODELS
OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF LAUNCHING SITES
OF THE MODERN LAUNCH VEHICLES**

K. V. Bezruchko, A. O. Davidov, V. P. Frolov

In the given work it is offered simply enough technology of making a model of power supply systems of launching site of launch vehicle. Also it is given functional dependences of parameters of separate aggregates and parts of power supply systems, which in total form mathematical models of power supply systems of launching site. It is shown the opportunity of automation of process of models of power supply systems of different structures making. The offered technology of making mathematical models of power supply systems of launching sites enables to analyze the efficiency of large list of possible structures of power supply systems and widely using the methods of mathematical modeling for designing, tests and exploitation of launching site of launch vehicle.

Key words: launching site, launch vehicle, power supply system, diesel power plant, uninterruptible power supply, transformer, mathematical model.

Безручко Константин Васильевич – д-р техн. наук, проф., проректор Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: AutonomEnerdy@khai.edu.

Давидов Алберт Оганезович – канд. техн. наук, докторант кафедры Двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: davidov@d4.khai.edu.

Фролов Виктор Петрович – начальник отдела Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина, e-mail: info@yuzhnoe.com.