

В. С. РЕВА¹, К. Н. ЗЕМЛЯНОЙ¹, В. П. ФРОЛОВ¹, К. В. БЕЗРУЧКО²

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

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

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ

В статье приведен анализ систем электроснабжения космических ракетных комплексов СЭС КРК, который показал, что в настоящее время потребляемая мощность комплексов достаточно возросла по сравнению с существующими комплексами, а наземное технологическое оборудование (НТО) имеет совершенно другую конфигурацию, электрические и эксплуатационные характеристики. В результате проведенного анализа были определены питающие номиналы напряжений, мощности комплексов, обеспечение внешней энергосистемой в качестве системы внешнего электроснабжения и выделены основные достоинства и недостатки, среди которых можно отметить, что структуры систем электроснабжения не соответствуют современным требованиям по надежности электроснабжения потребителей. Для создания оптимизированных структур СЭС наземного комплекса (НК) были определены общие требования к проектированию, технические требования, внешние факторы. Среди главных факторов можно выделить: количество зон КРК (структура), технических комплексов, удаленность их друг от друга, потребляемой мощности и категории питания потребителей, диапазона напряжений и технологии работ на КРК. От них напрямую зависит количество вводных щитов, распределительных пунктов, количество составных частей СЭС, преобразующей и коммутационной и защитной аппаратуры, мощности ИБП, количества сборочных единиц и т.д. Исходя из требований и внешних факторов для СЭС НК был выделен ряд особенностей, накладывающих эксплуатационные ограничения. Каждое из ограничений характеризуется количественными и качественными показателями. Немаловажным моментом является определение основных режимов работы СЭС, технологических процессов на КРК, определение потребителей для построения циклограмм и возможности описания расчетной мощности через коэффициент использования и средней нагрузки за интервал времени. На примере проведения циклограммы работ на техническом комплексе РКК «Циклон-4М» представлен график электрических нагрузок. Представленные особенности позволяют улучшить процесс создания СЭС, и соответственно, повысить надежность и безотказность работы систем электроснабжения наземных комплексов.

Ключевые слова: электроэнергия; система электроснабжения; графики нагрузок; структура; потребитель; эксплуатационные ограничения.

Введение

Системой электроснабжения (СЭС) называют совокупность взаимосвязанных электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией.

Система электроснабжения технологического оборудования является ключевой технологической системой, без которой невозможно функционирование НК. СЭС взаимодействует с большинством систем космического ракетного комплекса (КРК), обеспечивая их электроэнергией требуемого вида и качества во всех режимах эксплуатации.

Для создания систем электроснабжения проектируемых наземных комплексов (НК) необходимо учитывать энергоемкость потребителей технологического оборудования (ТО) и технических систем

(ТС) задействованных в подготовке РКН, а также количество потребителей разных номиналов напряжения, в том числе и низковольтного оборудования.

Для этого необходимо на раннем этапе проектирования определить состав и характеристики электрооборудования систем расположенных на наземном комплексе КРК. Так, например, был проведен анализ существующих систем электроснабжения, определены питающие номиналы, напряжений, мощности комплексов, обеспечение внешней энергосистемой в качестве системы внешнего электроснабжения, результаты показали, что на КРК «Днепр» потребление составляло чуть более 1 МВт, при проектировании КРК «Циклон-4» увеличилось и стало около 4,5 МВт. В настоящее время проектирование современного перспективного РКК «Циклон-4М» обуславливается установленной мощно-

стью потребителей в пределах от 5,5 до 6 МВт.

В результате проведенного анализа были определены основные недостатки, среди которых можно отметить, что структуры систем электроснабжения не соответствует современным требованиям по надежности электроснабжения потребителей.

В связи с этим можно сделать вывод, что на существующих космических ракетных комплексах были спроектированы СЭС, для питания ТО, которое в настоящее время имеет совершенно другую конфигурацию, электрические и эксплуатационные характеристики.

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 проектом этапе исходя из предъявляемых требований к электроснабжению потребителей.

1. Общие требования к проектированию СЭС

Проектирование СЭС как любой сложной системы является многоплановым, творческим и чрезвычайно трудоемким процессом, в котором используются теоретико-расчетные методы, экспериментальные средства и методики, эвристические подходы и приемы принятия решений.

При проектировании систем электроснабжения должны рассматриваться следующие вопросы:

- 1) перспектива развития систем электроснабжения с учетом рационального сочетания вновь создаваемых электрических сетей с действующими и вновь сооружаемыми сетями других классов напряжения;
- 2) обеспечение комплексного централизованного электроснабжения всех потребителей электрической энергии;
- 3) ограничение токов КЗ предельными уровнями, определяемыми на перспективу;
- 4) снижение потерь электрической энергии;
- 5) соответствие принимаемых решений условиям охраны окружающей среды.

При этом должны рассматриваться в комплексе внешнее и внутреннее электроснабжение с учетом возможностей и целесообразности технологического резервирования [1].

СЭС как основная жизнеобеспечивающая система на КРК обладает рядом особенностей, выделяющих ее из других систем.

Первая особенность СЭС – необходимость проведения расчетов для и практически полного совпадения во времени технологических процессов

на КРК, распределения и потребления

$$P_{\text{ген}} = P_{\text{потр}} + P_{\text{с.н}} + \Delta P,$$

где $P_{\text{ген}}$ – вырабатываемая источниками питания мощность;

$P_{\text{потр}}$ – потребляемая мощность;

ΔP – потери мощности [3].

Вторая особенность – это относительная быстрота протекания переходных процессов в ней. Волновые процессы совершаются в тысячные доли секунды. Это процессы, связанные с короткими замыканиями, включениями и отключениями, изменениями нагрузки, нарушениями устойчивости в системе.

Потребители электроэнергии систематизируются по следующим основным признакам:

- по мощности;
- по напряжению и роду тока;
- по надежности электроснабжения;
- по режимам работы.

В отношении обеспечения надежности электроснабжения приемники электроэнергии, согласно ПУЭ, разделяются на электроприемники I, II и III категории. Для космических ракетных комплексов основная масса – это электропотребители I категории (электропотребители перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, угрозу для безопасности проекта, значительный материальный ущерб) [1].

К системам электроснабжения в отдельных технических заданиях предъявляются требования технические требования.

2. Внешние факторы (ограничения) влияющие на структуру и процесс работы СЭС

На создание структуры и работу СЭС кроме технических требований, которые определяются в ТЗ влияют внешние факторы и эксплуатационные ограничения.

На рисунке 1 представлены основные факторы, которые влияют на построение структуры СЭС. От количества зон КРК (структура), технических комплексов, удаленность их друг от друга, потребляемой мощности и категории питания потребителей, диапазона напряжений и технологии работ на КРК напрямую зависит количество вводных щитов, распределительных пунктов, количество составных частей СЭС, преобразующей и коммутационной и защитной аппаратуры, мощности ИБП, количества сборочных единиц и т.д. [2].

Исходя из требований и внешних факторов для СЭС НК выделяют ряд особенностей, накладываю-



Рис.1 Факторы, влияющие на структуру СЭС

щих эксплуатационные ограничения. На рисунке 2 представлены ограничения, влияющие на структуру СЭС.

Основными из них являются:

- продолжительность работы источников и накопителей электроэнергии;
- диапазон напряжения питания электропотребителей;
- потребляемая мощность технологическим оборудованием, участвующем в подготовке и пуске РКН (с учетом кратковременных пиковых значений);
- информативность СЭС (возможность осуществлять информационное взаимодействие со смежными системами);
- габаритно-массовые характеристики состав-

ных частей СЭС;

- показатели надежности;
- климатические условия эксплуатации и др.

Важнейшими видами ограничений при создании и эксплуатации систем электроснабжения также есть ресурсные ограничения (стоимость, затраты энергии), статические (потребляемая мощность, диапазон напряжений, и пр.), а также ограничения по условиям эксплуатации (климатические, технологические, экологические, и пр.). Каждое из ограничений характеризуется количественными и качественными показателями.

Первые два ограничения могут быть определены анализом циклограмм электроснабжения СЭС и расчетом работы конкретного КРК во всех режимах работы.

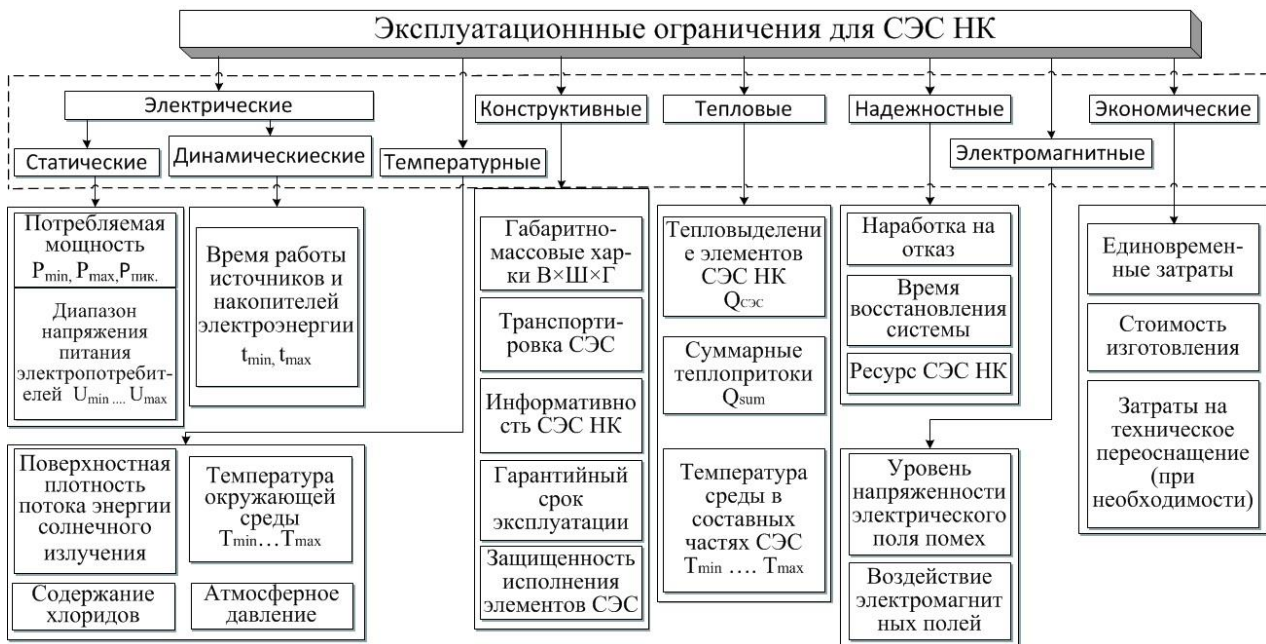


Рис. 2. Эксплуатационные ограничения СЭС

Массогабаритные характеристики влияют на возможность установки составных частей в определенные габариты.

Климатических условия обуславливают обеспечение электроснабжение потребителей во всем диапазоне температур.

2 Основные режимы работы СЭС

Основными режимами работы для СЭС НК являются следующие:

- работа при подготовке к пуску и пуск РКН;
- работа СЭС при отмене пуска;
- работа СЭС в межпусковой период;
- работа СЭС при проведении ГТО.

В каждом из этих режимов необходимо обеспечивать разную степень надежности питания потребителей путем использования различных источников электроэнергии. Был разработан подробный алгоритм работы источников электроэнергии СЭС НК для оптимального использования повторяющихся затрат на электроэнергию.

В качестве источников электроэнергии для СЭС (первичное электропитание) в основном рассматривают три независимых источника: два независимых ввода государственной электросети и автономный источник питания (АИП) [3].

Однако система электроснабжения помимо режимов своей работы зависит от технологии работы КРК. Особенно это подтверждается жесткой циклограммой подготовки РКН на стартовом комплексе.

К примеру, основной режим применения КРК по назначению (пусковая миссия) включает в себя множество технологических процессов:

- подготовку технического и заправочного комплексов к работам;
- подготовку технического комплекса ракета-носителя к работам (ТК РН);
- заправку блока второй ступени;
- заправку КА;
- подготовку Ки ГБ на техническом комплексе;
- подготовку РКН на ТК РН.
- подготовку СК к приему РКН;
- подготовку РКН на СК;
- предстартовую подготовку и пуск РКН.

Каждый из процессов характеризуется своими технологическими операциями и циклограммой работы.

Наложив на циклограмму работы электропотребления участвующих в той или иной технологической операции систем (потребителей), получаем графики электропотребления от СЭС в различных режимах работы. В качестве примера на рисунке 3 представлен график электрических нагрузок при выполнении работ на ТК РКК «Циклон-4М». На графике градацией выделено 15 работающих систем, каждая из которых имеет до десятка потребителей.

Основным показателем режимов работы электропотребителей является коэффициент использования средней активной мощности одного потребителя к номинальному значению [3, 4].

$$P_H = \sum_1^n P_H, P_{c\theta} = \frac{1}{\theta} \int_t^{t+\theta} P(t)dt, K_H = P_{c\theta} / \sum_1^n P_H,$$

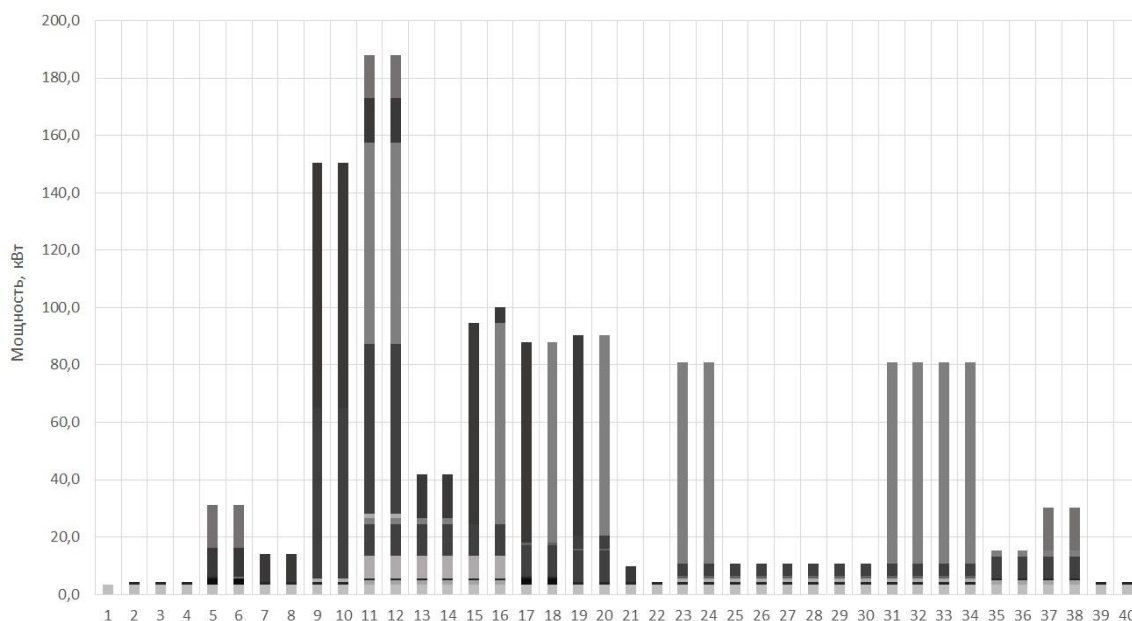


Рис. 3. График электрических нагрузок при выполнении работ на ТК «Циклон-4М»

где $P_{с0}$ – средняя нагрузка за интервал времени θ , кВт;

$K_{и}$ – коэффициент использования активной мощности потребителей;

Определение расчетной мощности возможно через коэффициент использования $P_{рас} = K_{м} K_{и} P_{н}$.

Выводы

Проведенный анализ СЭС КРК показал, что в настоящее время потребляемая мощность комплексов достаточно возросла по сравнению с существующими комплексами, а ТО имеет совершенно другую конфигурацию, электрические и эксплуатационные характеристики.

Для создания оптимизированных структур СЭС были определены общие требования к проектированию, технические требования, внешние факторы и ограничения, влияющие на структуру и процесс работы СЭС.

Немаловажным моментом является определение основных режимов работы СЭС, технологических процессов на КРК, определение потребителей для построения циклограмм и возможности описания расчетной мощности через коэффициент использования и средней нагрузки за интервал времени. На примере проведения работ на ТК РКК «Циклон-4М» построен график электрических нагрузок.

Изложенные особенности позволяют улучшить процесс создания СЭС, и соответственно, повысить надежность и безотказность работы систем электроснабжения наземных комплексов, что способствует подтверждению выполнения требований Заказчиков пусковых услуг к электроснабжению.

Литература

1. Правила улаштування електроустановок [Текст]. – К. : Мінерговузгілля України, 2017. – 617 с.
2. 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. 137-140.
3. Иванов, В. С. Режимы потребления и качество энергетических систем электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / В. С. Иванов, В. И. Соколов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
4. Бирюков, Г. П. Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов [Текст] / Г. П. Бирюков, Ю. Ф. Кукушкин, А. В. Торпачев. – М. : Изд-во МАИ, 2002. – 264 с.

References

1. *Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok* [Rules of electrical installations]. Kiev, Minenerhovuhillya Ukrayiny Publ., 2017. 617 p.
2. Reva, V. S. *Razrabotka tekhnologicheskogo grafika raboty istochnikov pitaniya iz sostava sistemy elektrosnabzheniya nazemnogo kompleksa* [Technological schedule development of power sources operation as part of ground complex power supply system]. *Aviacionno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2012, vol. 7(94), pp. 137-140.
3. Ivanov, V. S., Sokolov, V. Y. *Rezhimy potrebleniya i kachestvo energeticheskikh sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii* [Consumption modes and quality of power supply systems for industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 336 p.
4. Biryukov, G.P., Kukushkin, Yu. F., Torpachev, A. V. *Osnovy obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti startovykh kompleksov* [Basics of ensuring the reliability and safety of launching complexes]. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2002. 264 p.

Поступила в редакцию 15.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НАЗЕМНИХ КОМПЛЕКСІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ І РЕЖИМІВ РОБОТИ

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

У статті наведено аналіз систем електропостачання космічних ракетних комплексів СЕП КРК, який показав, що на даний час споживана потужність комплексів досить зросла в порівнянні з існуючими комплексами, а наземне технологічне обладнання (НТО) має зовсім іншу конфігурацію, електричні та експлуатаційні характеристики. В результаті проведеного аналізу були визначені основні номінали напруг, потужності комплексів, забезпечення зовнішньої енергосистемою як системи зовнішнього електропостачання і виділені основні переваги та недоліки, серед яких можна відзначити, що структури систем електропостачання не відповідає сучасним вимогам по надійності електропостачання споживачів. Для створення оптимізованих структур СЕП наземного комплексу (НК) були визначені загальні вимоги до проектування, технічні вимоги, зовнішні чинники. Серед головних чинників можна виділити: кількість зон КРК (структура), технічних компле-

ксив, віддаленість їх один від одного, споживаної потужності і категорії живлення споживачів, діапазону напруг і технології робіт на КРК. Від них безпосередньо залежить кількість розподільчих щитів, розподільчих пунктів, кількість складових частин СЕС, перетворюючої і комутаційної і захисної апаратури, потужності ДБЖ, кількості складальних одиниць і т.д. Виходячи з вимог і зовнішніх чинників для СЕП НК було виділено ряд особливостей, що накладають експлуатаційні обмеження. Кожне з обмежень характеризується кількісними і якісними показниками. Важливим моментом є визначення основних режимів роботи СЕП, технологічних процесів на КРК, визначення споживачів для побудови циклограм і можливості опису розрахункової потужності через коефіцієнт використання і середнього навантаження за інтервал часу. На прикладі проведення циклограм робіт на технічному комплексі РКК «Циклон-4М» представлено графік електричних навантажень. Представлені особливості дозволяють поліпшити процес створення СЕС, і відповідно, підвищити надійність і безвідмовність роботи систем електропостачання наземних комплексів.

Ключові слова: електроенергія; система електропостачання; графіки навантажень; структура; споживач; експлуатаційні обмеження.

FEATURES OF CREATING ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS FOR GROUND-BASED COMPLEXES CONSIDERING OPERATIONAL LIMITATIONS AND OPERATING MODES

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

The article analyses the power supply systems of space rocket complexes PSS SRC, which showed that currently the power consumption of the complexes has increased sufficiently compared to existing complexes, and ground-based technological equipment (GTE) has a completely different configuration, electrical and operational characteristics. As a result of the analysis, the supply ratings of the voltages and capacities of the complexes were identified, providing an external power system as an external power supply system and highlighted the main advantages and disadvantages, among which it can be noted that the structure of power supply systems does not meet modern requirements for the reliability of power supply to consumers. To create an optimized structures PSS ground complex (GC) were determined by the general requirements for the design, technical requirements, external factors. Among the main factors, we can distinguish the number of SRC zones (structure), technical complexes, their distance from each other, power consumption and consumer power category, voltage range, and SRC technology. The number of input boards, distribution points, the number of components of PSS, conversion and switching and protective equipment, UPS power, the number of assembly units, etc. directly depends on them. Based on the requirements and external factors for PSS GC, many features were identified that impose operational limitations. Each of the restrictions is characterized by quantitative and qualitative indicators. The important moment is the determination of the main modes of operation of the PSS, the technological processes at the SRC, the determination of consumers for the construction of cyclograms and the possibility of determining the calculated power through the utilization factor and the average load over the time interval. On the example of a cyclogram of work at the SRC Cyclone-4M technical complex, a graph of electrical loads is presented. The features presented make it possible to improve the process of creating a PSS, and accordingly, to increase the reliability and dependability of the operation of electrical supply systems for ground complexes.

Keywords: electric power; power supply system; load schedules; structure; consumer; operational limitations.

Рева Вадим Сергеевич – начальник группы, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

Земляной Константин Николаевич – начальник отдела, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

Фролов Виктор Петрович – канд. техн. наук, заместитель начальника комплекса, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

Безручко Константин Васильевич – д-р техн. наук, проф., Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков Украина.

Reva Vadym Sergiovich – Head of the group, SE Design Office “YUZHNOYE”, Dnipro, Ukraine, e-mail: RevaVS@science.yuzhnoye.com, ORCID Author ID: 0000-0002-1104-8398.

Zemlyany Kostyantyn Nikolaiovich – Head of the department, SE Design Office “YUZHNOYE”, Dnipro, Ukraine, e-mail: ZemlianyiKN@science.yuzhnoye.com, ORCID Author ID: 0000-0001-5043-3566.

Frolov Victor Petrovich – Candidate of Technical Science, deputy head of the complex, SE Design Office “YUZHNOYE”, Dnipro, Ukraine, e-mail: FrolovVP@science.yuzhnoye.com, ORCID Author ID: 0000-0001-5786-8765.

Bezruchko Konstantin Vasilievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: k.bezruchko@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-3818-5624.