

УДК 62-50:681.5

## ПРИНЦИПЫ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© 2016 С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев

Воронежский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 03.10.2016

Рассматриваются пути повышения надёжности функционирования ответственных – критических подсистем летательных аппаратов. Показано, что перспективным направлением обеспечения живучести таких объектов является воспроизведения соответствующего свойства биологических систем – гомеостазиса. Выдвигается предположение, что указанное свойство в технических системах может быть реализовано на основе эволюционных принципов многоальтернативности: многоуровневости структуры и управления, многообразия и разделения функций, модульности строения. На биологических примерах раскрывается содержание этих принципов и демонстрируется возможность их распространения на технические системы критического назначения. В качестве примера реализации принципов многоальтернативности в летательных аппаратах рассматривается построение системы электроснабжения космической станции. Система содержит несколько альтернативных источников энергии, имеющих многоуровневую иерархическую структуру управления. Для реализации принципа разделения функций используется разбиение общей зоны управления на неперекрывающиеся диапазоны активного регулирования, в результате чего существенно упрощается задача обеспечения устойчивости и показателей качества системы, а также обеспечение унификации и взаимозаменяемости контуров регулирования. Разделение функций, модульность и иерархичность строения исключают возможность каскадного (технологически связанного) нарастания отказов в системе и обеспечивают её живучесть.

Ключевые слова: *летательный аппарат, космическая станция, автономная система электроснабжения, живучесть, принцип многоальтернативности*

### 1. Постановка задачи.

Задача управления критическими подсистемами летательных аппаратов (ЛА) во многих случаях сводится к обеспечению их живучести, т.е. сохранению работоспособности в условиях частичных отказов, том числе, ценой снижения уровня функциональности. С ростом сложности таких подсистем, например, подсистем электроснабжения, а также в связи с введением многократного резервирования, сформулированная задача сталкивается с проблемой перекрёстного влияния совместно работающих узлов, ухудшающего их общую устойчивость и показатели надёжности [1-3].

Кибернетический подход к анализу этой задачи указывает на то обстоятельство, что в биологических системах наблюдается обратное явление: с ростом сложности биосистем их способность к сбалансированному развитию в условиях непредсказуемого изменения внешней среды и давления естественного отбора возрастает. Указанное свойство «неусложняемой простоты» живых организмов и систем даёт основания

предположить, что в основе их жизнедеятельности лежат некоторые эволюционные принципы, воспроизведение которых в антропогенных (созданных человеком) системах позволит реализовать в последних высокую степень живучести в виде прямого аналога биологического гомеостазиса [4].

В предлагаемой работе в качестве таких принципов выдвигаются [5]: принцип многоуровневости структуры и управления; принцип многообразия и разделения функций; принцип модульности, составляющие общую концепцию многоальтернативности построения и функционирования сложных систем [6-9]. Исходное, биологическое содержание этих принципов кратко раскрывается ниже на примерах живых организмов, и затем рассматривается пример их реализации в системе электроснабжения космической станции.

### 2. Биологические истоки принципов многоальтернативности.

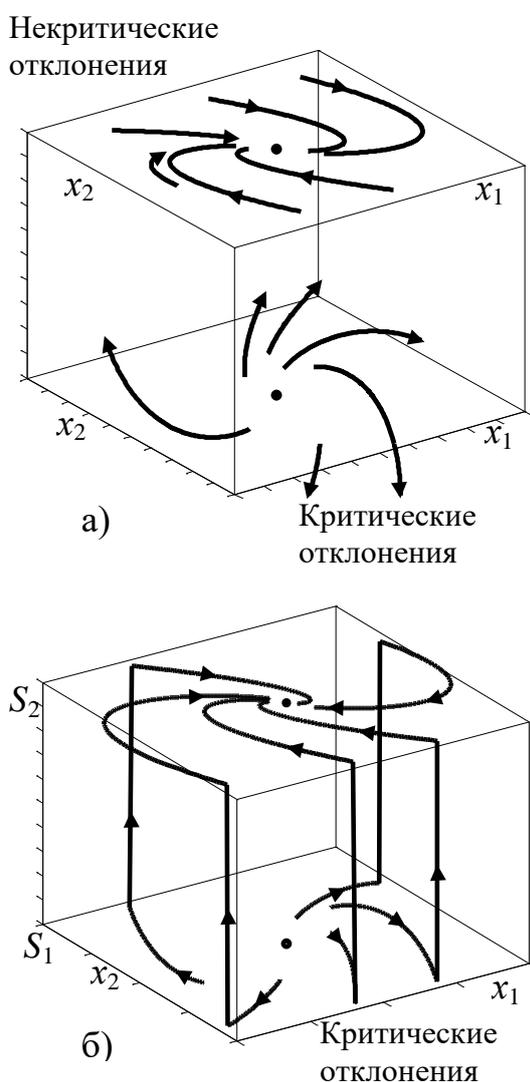
**2.1. Принцип многоуровневости.** Классическим примером многоуровневой организации приспособительных механизмов в биологических системах является процесс гомеостаза [10], который осуществляется в общем плане за счёт системы управления с двумя и более иерархическими уровнями, одни из которых непрерывно

*Подвальный Семён Леонидович, доктор технических наук, профессор. E-mail: spodvalny@yandex.ru*  
*Васильев Евгений Михайлович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: vgtu-aits@yandex.ru*

поддерживают заданное состояние организма при небольших изменениях в окружающей среде, а другие реагирует только на критические отклонения этого состояния. На рис. 1 показано схематическое представление этого процесса для двух случаев:

а) параметрический уровень управления, стабилизирующий заданное состояние биосистемы только при не критических отклонениях её физиологических параметров;

б) структурный уровень, запускающий механизмы существенной перестройки организма, которые носят качественно новый характер, в частности, могут быть прерывистыми, ступенчатыми, порождающими альтернативные структуры управления.



**Рис. 1.** Представление гомеостаза как многоуровневого управления поведением: а) параметрический уровень; б) структурный уровень – переход от структуры  $S_1$  к структуре  $S_2$

Конкретным примером гомеостаза является многоуровневая система управления содержанием глюкозы в крови человека, работа которой

схематично может быть описана следующим образом: при превышении содержания глюкозы физиологически нормальных значений поджелудочная железа начинает выделять инсулин, побуждающий поглощение глюкозы из крови мышечными и жировыми клетками. Если ресурсов этого способа регулирования оказывается недостаточно, и содержание глюкозы продолжает расти, то начинается её прямое выведение из организма с помощью почек, т.е. начинает работать другой механизм регулирования глюкозы. Аналогично, при снижении уровня глюкозы сначала реагируют надпочечники, вырабатывая адреналин, стимулирующий выброс запасов глюкозы в кровь, а затем начинает нарастать чувство голода. В результате по мере отклонения содержания сахара в любую сторону от физиологической нормы последовательно – по мере исчерпания ресурсов низкого уровня – вступают в действие механизмы более высокого уровня управления. Таким образом, многоуровневый принцип функционирования образует, в результате накопления, наращивания числа приспособлений, многослойный защитный «пояс», предохраняющий биосистему от непредвиденных изменений окружающей среды.

2.2. Многообразие и разделение функций. В наиболее общем плане многообразие форм строения материи обуславливает эволюционный, лавинообразный рост числа организованных структур, обладающих новыми физическими и химическими свойствами, а значит, и способностью к устойчивому существованию в разных условиях. Поскольку совокупность однородных элементов не порождает новых свойств, то возможность эволюции предопределяется наличием только разнотипного «исходного материала».

В биологических системах эволюционная необходимость этого многообразия заключается не только в обеспечении непрерывности трофических (пищевых) связей в биосистеме при возникновении условий, неблагоприятных для существования той или иной её части (видовой уровень), но и в поставке генетического материала для механизма естественного отбора, т.е. лежит в основе эволюции живого мира (генетический уровень) [11]. На уровне отдельных организмов многообразие приспособительных механизмов широко проявляется в форме специализации и разделения не только физиологически различных, но и одинаковых функций организма, реализуемых в разных условиях. В качестве примера можно привести результат эволюции зрения животных, в частности, приматов, приведший к формированию цветовосприимчивых, но с низкой светочувствительностью зрительных рецепторов – колбочек, функционирующих в светлое время суток, и высокочувствительных

рецепторов – палочек, не воспринимающих цвет и функционирующих при малых уровнях яркости.

Широко известна специализация раннелетних и позднелетних форм растений одного вида, цветущих в разное время года вплоть до образования яровых и озимых форм. Ещё более поразительным примером многообразия и разделения функций является наличие у высших млекопитающих так называемых стволовых клеток, которые изначально не являются функционально ориентированными, но способны приобретать узкую функциональную специализацию в зависимости от текущих потребностей организма.

Таким образом, источником эволюции в природе является многообразие её форм, порождающее качественно новые структуры. В том случае, если указанное многообразие обеспечивается в рамках одной физической или биологической системы, то такая система приобретает эволюционные преимущества: устойчивость существования и эффективное использование энергии внешней среды и внутренних ресурсов. Отмеченный многоальтернативный характер поведения сложных систем сформулирован У.Эшби в виде информационного принципа необходимого разнообразия [12]: «Только многообразие может уничтожить многообразие», справедливый для систем любой природы.

**2.2. Принцип модульности.** Рассматривая процесс существования и развития биологической системы как процесс перехода через неравновесные состояния к очередному варианту своего построения, следует выделить в этом процессе принцип блочного формирования новых структур из уже «опробованных», т.е. жизнеспособных биологических блоков, имеющих специализированные функции [13]. В частности, известное многообразие белков обеспечивается комбинациями 20 основных аминокислот, размещение которых в белке закодировано в генетическом коде цепочкой триплетов, использующих всего четыре нуклеотида: аденин – А, гуанин – G, тимин – Т, цитозин – С. Указанный набор блоков с избытком обеспечивает всё белковое разнообразие животного мира: цепочка длиной всего в 100 триплетов способна сформировать  $20^{100}$  вариантов белков, фактические же размеры последовательностей достигают нескольких тысяч и даже десятков тысяч триплетов.

В работе [14] отмечается, что «наиболее экономный способ производства низкоэнтропийного продукта состоит в комбинировании уже имеющихся низкоэнтропийных структур, эволюция в нашем понимании должна происходить не только и даже не столько путем малых изменений, сколько скачками, обусловленными новыми сочетаниями старых структур», и

подчёркивая, тем самым, комбинаторную природу эволюции. Отсюда следует, что модульность, дискретность структур необходимо обеспечивает рассмотренные выше принципы многообразия и многоуровневости.

Можно заключить, что биологические системы достигли высокой степени приспособительного, критического взаимодействия с внешней средой путём селективной специализации этого взаимодействия на основе набора достаточно простых механизмов разделения функций, модульности и иерархичности структуры, и не испытывают ограничений, связанных с растущей функциональной сложностью организмов. Эти приспособительные механизмы объединяются единой концепцией многоальтернативности. Перейдём к рассмотрению примера практического использования изложенных выше принципов.

### 3. Практическая реализация принципов многоальтернативности.

Покажем, каким образом принципы многоуровневости, модульности и разделения функций реализуются в системе электроснабжения (СЭС) космической станции (КС) [15-17]. В рассматриваемую систему входят (рис. 2):

- подсистема солнечных батарей (СБ), являющаяся первичным источником энергии на борту станции;
- подсистема источника высокого напряжения, находящегося на внешнем по отношению к КС аппарате и играющего роль вторичного источника (ВИ) энергии;
- подсистема электрохимических аккумуляторных батарей (АБ), накапливающих энергию при её избытке в системе и отдающей – при недостатке.

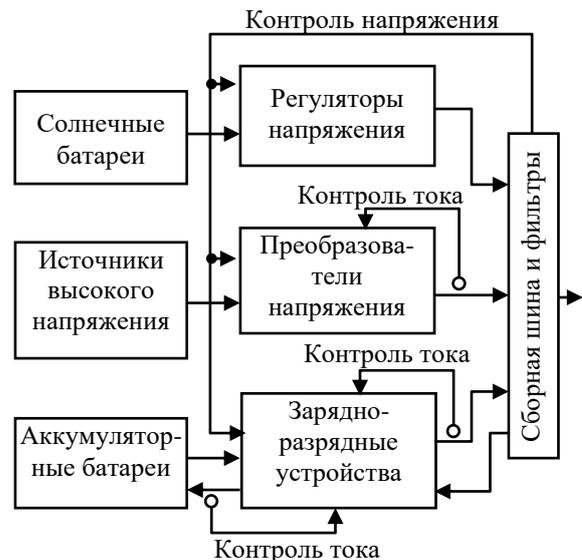


Рис. 2. Общий состав СЭС КС

Способ взаимодействия этих подсистем образует иерархическую структуру, в которой передача функций электроснабжения каждому последующему уровню происходит только при полностью исчерпанных энергетических ресурсах предшествующего уровня.

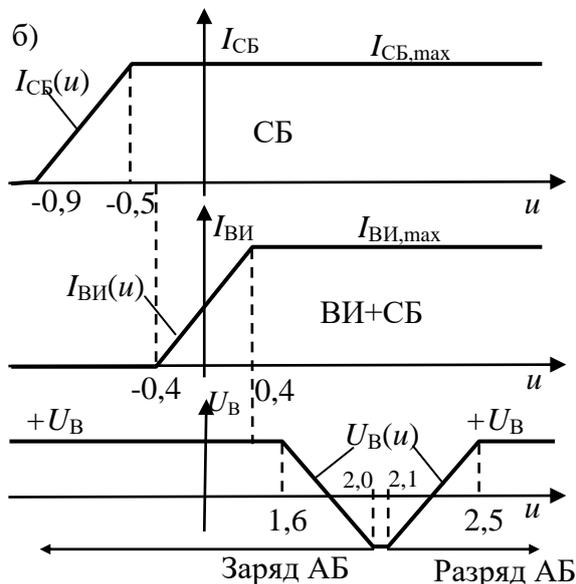


Рис. 3. Иллюстрация принципов многоальтернативности в структуре и режимах работы СЭС КС

На рис. 3 показано, что при выходе управляющего сигнала  $u$  за зону регулирования  $[-0,9; -0,5]$  подсистема СБ отдаёт в нагрузку свой полный ток  $I_{CB,max}$ , и в работу вступает подсистема внешнего источника (диапазон регулирования  $[-0,4; 0,4]$ ). При полностью загруженных СБ и внешнего источника ( $I_{CB}=I_{CB,max}$  и  $I_{ВИ}=I_{ВИ,max}$ ) начинается отбор энергии от АБ. При снижении нагрузки электроснабжение потребителей последовательно передаётся от одной подсистемы к другой в обратном порядке: сначала отключаются и переходят в режим заряда аАБ, затем при избытке энергии отключаются внешние ВИ энергии. При этом избыток энергии, при необходимости, используется для заряда АБ.

Подсистема СБ, как основной источник первичной энергии, также построена на принципе многоуровневости управления, в соответствии с которым по мере роста тока нагрузки поочередно подключается необходимое число  $n \leq N_{CB}$  батарей таким образом, что  $n-1$  батарей отдают в нагрузку максимально возможный ток  $I_{CB,max}$ , одна батарея с условным номером  $n$ , подключившаяся последней, работает в режиме широтно-импульсного регулирования отдаваемого тока, а оставшиеся  $N_{CB}-n$  батарей при текущем уровне нагрузки остаются незадействованными. В результате, при любом значении тока нагрузки осуществляется регулирование не всей отдаваемой

подсистемой солнечных батарей мощности, а только той её части, которая приходится на одну батарею. Этим достигается не только существенное упрощение задачи обеспечения устойчивости и показателей качества системы регулирования, но и возможность унификации контуров управления каждой батареей и блочного построения подсистемы из взаимозаменяемых блоков, что в совокупности обеспечивает надёжное функционирование подсистемы в широком диапазоне изменения её параметров, нагрузок и при отказах отдельных блоков. В частности, отказ или отключение любого количества солнечных батарей не изменяет динамические свойства системы управления. Кроме того, модульность и иерархичность строения исключают возможность каскадного (технологически связанного) нарастания отказов в системе.

Для технической реализации изложенного принципа разделения функций и иерархичности функционирования подсистемы СБ используется разбиение общей зоны её управления на неперекрывающиеся диапазоны активного регулирования для каждой батареи. На рис. 4 показан пример такого разбиения для  $N_{CB}=3$ , где  $u$  – сигнал управления на входе широтно-импульсного преобразователя,  $I_{CB1}, \dots, I_{CB3}$  – токи солнечных батарей СБ<sub>1</sub>, ..., СБ<sub>3</sub>, отдаваемые в нагрузку.

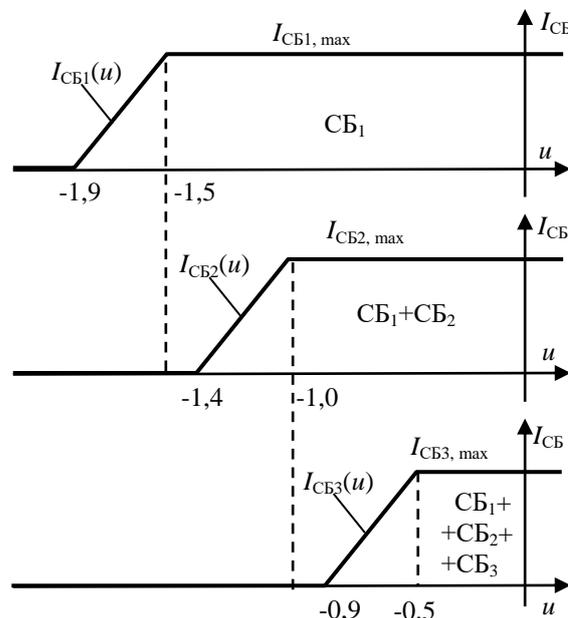


Рис. 4. Регулировочные характеристики подсистемы СБ на примере трёх СБ

При значениях сигнала управления  $u > -0,5$  все три батареи будут стремиться отдать свой максимальный ток в нагрузку. Если сумма этих токов избыточна и для электроснабжения достаточно, например, тока одной батареи, то в результате действия обратной связи управление  $u$  будет уменьшаться, последовательно отключая

от нагрузки СБ<sub>3</sub> и СБ<sub>2</sub> до тех пор, пока  $u$  не войдёт в диапазон  $-1.9 \leq u \leq -1,5$  активного регулирования тока батареи СБ<sub>1</sub>.

Для обеспечения высокой надёжности подсистемы вторичных источников энергии использован многоальтернативный принцип разделения и специализации её функций, обеспечивающих устойчивую работу подсистемы в различных режимах. Поскольку высоковольтный источник энергии является источником напряжения (см. рис. 2), то наиболее распространённым критическим режимом его функционирования является режим перегрузки по току, и техническая реализация указанного принципа заключается в том, что при токах  $I_{ВИ}$ , не превышающих заданного значения  $I_{ВИ, \max}$ , в подсистеме функционирует контур регулирования напряжения; но если в случае аварийного, либо штатного роста мощности потребления ток достигнет критической величины  $I_{ВИ, \max}$ , то управление переходит к контуру регулирования тока, обеспечивающему сохранение равенства  $I_{ГПР} = I_{ГПР, \max}$ , безопасного для оборудования. Контур регулирования (стабилизации) напряжения при этом параметрически блокируется за счёт большего коэффициента передачи канала управления током. При снятии нагрузки автоматически осуществляется обратная передача функции управления подсистемой от контура тока к контуру напряжения.

Подсистема АБ функционирует в двух режимах:

- режим накопление энергии при её избытке на станции;
- режим снабжение потребителей электроэнергией при её недостатке (затенение СБ и отсутствие внешнего ВИ питания).

В каждом из указанных режимов подсистема АБ управляется двумя независимыми каналами регулятора (канал заряда и канал разряда), каждый из которых содержит двухуровневую систему управления с разделением функций: регулированием по напряжению (при токах, не превышающих критические значения), и регулированием по току (при токах, стремящихся превысить критическое значение). Таким образом, в СЭС в целом и в каждой из её подсистем широко используются принципы многоальтернативности: многоуровневости, модульности и разделения функций, обеспечивающие в ней высокую надёжность электроснабжения потребителей при критических значениях нагрузки и отказах отдельных блоков.

**4. Выводы:** решение задачи повышения надёжности ответственных систем авиационно-космического назначения может быть осуществлено путём реализации в них аналога свойства гомеостазиса, присущего живым организмам. Анализ способов обеспечения этого свойства в

биологических системах позволил сформулировать основные принципы управления в гомеостатических системах – многоуровневость, модульность, многообразие и разделение функций, образующие в своей совокупности концепцию многоальтернативного управления. Применение указанных принципов для построения СЭС КС показывает, что живучесть рассматриваемой системы достигается в результате:

- многоуровневой иерархии системы управления, создающей многообразие её алгоритмов в результате передачи управления и распределения функций электроснабжения между подсистемами и в каждой из них в зависимости от текущего режима работы;
- модульности, многократно снижающей возможность каскадного (технологически связанного) развития аварийной ситуации и отказа;
- разделения функций, обеспечивающего высокую эффективность каналов управления с узкими функциональными назначениями.

На основе этих принципов реализуется активное перенаправление энергетических и информационных потоков системы и изменение алгоритмов функционирования её подсистем в экстремальных ситуациях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Петровичев, М.А.* Система энергоснабжения бортового комплекса космических аппаратов / *М.А. Петровичев, А.С. Гуртов.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. университета, 2007. 88 с.
2. *Шиняков, Ю.А.* Выбор структуры систем электроснабжения низкоорбитальных космических аппаратов / *Ю.А. Шиняков, А.С. Гуртов, К.Г. Гордеев, С.В. Ивков* // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. №1. С.103-113.
3. *Шиняков, Ю.А.* Энергетический анализ структурных схем электроснабжения автоматических космических аппаратов // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, №8. С.152-155.
4. *Филимонов, Н.Б.* Проблема гомеостатического управления динамическими системами // В сборнике: Устойчивость и процессы управления. Материалы III международной конференции. – СПб.: Изд. дом Федоровой Г.В., 2015. С. 97-98.
5. *Подвальный, С.Л.* Многоальтернативные системы: обзор и классификация // Системы управления и информационные технологии. 2012. Т.48, №2. С. 4-13.
6. *Подвальный, С.Л.* Многоальтернативное управление открытыми системами: концепция, состояние и перспективы / *С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев* // Управление большими системами: сборник трудов. – М.: ИПУ РАН. 2014. № 48. С. 6-58.
7. *Подвальный, С.Л.* Интеллектуальные системы многоальтернативного управления: принципы построения и пути реализации / *С.Л. Подвальный,*

- Е.М. Васильев // XII Всерос. совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН: труды. (Москва, 16-19 июня 2014 г.). – М.: ИПУ РАН. 2014. С. 996-1007.
8. Подвальный, С.Л. Снижение техногенного риска опасных объектов на основе использования эволюционных принципов многоальтернативности / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж: ВГТУ, 2015. С. 33-38.
  9. Подвальный, С.Л. Эволюционные принципы построения интеллектуальных систем многоальтернативного управления / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 57, №3. С. 4-8.
  10. Эшби, У.Р. Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения. – М.: Изд. иностр. лит., 1962. 397 с.
  11. Тимофеев-Ресовский, Н.В. Краткий очерк теории эволюции / Н.В. Тимофеев-Ресовский, Н.Н. Воронцов, А.В. Яблоков. – М.: Наука, 1977. 303 с.
  12. Эшби, У.Р. Введение в кибернетику. – М.: КомКнига, 2005. 432 с.
  13. Ратнер, В.А. Молекулярно-генетическая система управления / В.А. Ратнер // Природа. 2001. №5. С. 16–22.
  14. Галимов, Э.М. Феномен жизни: между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции. – М.: Едиториал УРСС, 2006. 256 с.
  15. Тищенко, А.К. Унифицированная система энергоснабжения для космических аппаратов / А.К. Тищенко, П.Т. Ганкевич, Г.Д. Лившин // Энергия. Научно-практический вестник. 1999. №3. С. 34-51.
  16. Тищенко, А.К. Автономная система электропитания: пат. 2211479 Рос. Федерация: МПК G05F1/66, H02J7/34 / А.К. Тищенко, П.Т. Ганкевич, В.В. Савенков, Г.Д. Лившин; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Орбита». – №2001100777/09; заявл. 09.01.2001; опубл. 27.08.2003, Бюл. № 24 (III ч.). С. 796.
  17. Тищенко, А.К. Многоальтернативное управление критическими режимами системы электроснабжения космической станции / А.К. Тищенко, Е.М. Васильев, А.О. Тищенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11, № 2. С. 101-106.

## MULTI-ALTERNATIVE CONTROL PRINCIPLES IN CRITICAL AEROSPACE FACILITIES

© 2016 S.L. Podvalniy, E.M. Vasilyev

Voronezh State Technical University

Improving the reliability of aircraft subsystems is considered. It is shown that a promising direction to ensure the survivability of such objects is the play of the corresponding properties of biological systems - homeostasis. It suggests that the specified property in the technical systems can be implemented on the basis of evolutionary principles multi-alternative: multilevel structure and control, diversity and separation of functions, modular structure. In the biological examples disclosed the content of these principles and demonstrates the possibility of extending them to the mission-critical technical systems. As an example of the principles multi-alternative seen in aircraft construction space station power supply system. The system comprises a plurality of alternative energy sources having a multilevel hierarchical control structure. To implement the principle of separation of functions is used partition common control area into non-overlapping ranges of active regulation, thereby significantly simplifies the task of ensuring the stability and performance of the system of quality, and to ensure harmonization and interoperability of control loops. The separation of functions, modularity and hierarchical structure exclude the possibility of a cascade (technologically connected) refusals rise in the system and ensure its vitality.

Key words: *aircraft, space station, stand-alone power supply system, vitality, multi-alternative principle*