

УДК 621.311

П.Г. ГАКАЛ, канд. техн. наук; доц. НАУ «ХАИ», г. Харьков

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Запропоновано здійснювати оптимізацію систем терморегулювання космічних апаратів з використанням теорії нечітких множин, що дозволяє проводити формування глобального показника ефективності на базі часткових показників в умовах їх нечіткого завдання.

It was proposed to carry out a thermal control system of spacecrafts optimization using fuzzy sets theory, that allowing to provide a global efficiency factor forming on the base of particular efficiency factors in the case of them fuzzy setting.

Мировой тенденцией развития космических аппаратов (КА) является расширение их функциональных возможностей, что приводит к росту потребляемой мощности, большая часть которой выделяется в элементах оборудования КА в виде теплоты. Для отвода теплоты от элементов оборудования КА, переноса ее к месту теплосброса с последующим сбросом в окружающую среду (ОС), а также для поддержания требуемого температурного режима работы оборудования используются системы терморегулирования. Рост энерговооруженности и линейных размеров новых космических аппаратов в условиях жестких конструктивных и массогабаритных ограничений приводит к усложнению условий отвода теплоты от элементов оборудования КА, условий переноса теплоты к месту теплосброса с последующим отводом ее в ОС. В результате ухудшения температурного режима работы оборудования КА снижаются его функциональные возможности, надежность работы и ресурс как отдельных элементов оборудования КА, так и всего КА в целом. Поэтому, проблема создания высокоэффективных систем терморегулирования КА становится решающей, а ее решение – важной научно-практической задачей.

Процесс оптимизации системы терморегулирования (СТР) подразумевает создание глобального показателя эффективности на основе частных показателей. Однако для СТР не всегда удается однозначно выделить какой либо один главный показатель эффективности. Этот процесс характеризуется совокупностью частных показателей, находящихся во взаимном противоречии друг с другом, когда улучшение по одному из показателей ведет к ухудшению по другому и наоборот. Кроме того, показатели эффективности и ограничения имеют различную значимость («вес») в каждой конкретной задаче, они часто имеют трудноформализуемую или даже неформализуемую природу, задаются неопределенно, на вербальном уровне, в форме утверждений общего характера о предпочтительности. Для работы с выражениями такой природы Л. Заде [1] было предложено использовать теорию нечетких множеств, которая позволила математически формализовать неопределенности неслучайной природы. Согласно определению Л. Заде, нечеткое множество – это класс объектов, в котором нет резкой границы между теми объектами, которые входят в это множество, и теми, которые в него не входят. Степень соответствия того или иного объекта тому или иному множеству было предложено характеризовать степенью принадлежности (желательности) объекта к данному классу. То есть, если существует универсальное множество $X = \{x\}$ (конечное и бесконечное), то нечеткое множество A в x будет характеризоваться парой $A = \{x, \mu_A(x)\}$, где $\mu_A(x)$ – степень принадлежности объекта

x к A . Функция принадлежности $\mu_A(x)$ является обобщением понятия характеристической функции обычного множества, поскольку переходит в нее в предельном случае, когда содержит лишь две точки 0 и 1, то есть когда множество четкое (0 – объект x не входит в данное множество, 1 – входит). Следовательно, нечеткость будет выражаться численной величиной функции желательности, изменяющейся в диапазоне 0...1.

При постановке задачи инженерного синтеза формируется множество альтернатив, а также множество ограничений, которые необходимо учитывать при выборе между различными альтернативами. С учетом введенного понятия функции желательности, каждой альтернативе ставим в соответствие некоторую функцию желательности, с помощью которой каждой альтернативе будет ставиться в соответствие выигрыш (или проигрыш). То есть, если $X = \{x\}$ – заданное множество в пространстве альтернатив, то нечеткая цель будет отождествляться с нечетким фиксированным множеством G в X с функцией желательности $\mu_G(x)$. Аналогично определяется нечеткое ограничение C в X , которое также будет характеризоваться парой $C = \{x, \mu_C(x)\}$. Таким образом, в качестве показателя эффективности будет использоваться функция желательности $\mu_G(x)$ с учетом ограничения C , которая также характеризуется функцией желательности $\mu_C(x)$.

Глобальный показатель эффективности включает в себя частные показатели эффективности, каждый из которых также характеризуется своей функцией желательности. Рассмотрим формирование глобального показателя эффективности на базе частных показателей, так называемую свертку показателей в случае неравнозначных показателей. В этом случае каждому показателю эффективности ставится в соответствие коэффициент относительной важности α_i , и глобальный показатель эффективности может формироваться следующими способами:

- максиминный подход и его модификации

$$\mu_D(\vec{x}) = \min(\alpha_1 \mu_1(\vec{x}), \alpha_2 \mu_2(\vec{x}) \dots \alpha_N \mu_N(\vec{x}))$$
 или

$$\mu_D(\vec{x}) = \min(\mu_1^{\alpha_1}(\vec{x}), \mu_2^{\alpha_2}(\vec{x}) \dots \mu_N^{\alpha_N}(\vec{x})),$$
 где $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$, важным свойством данной свертки является сохранение нормировки $\mu_D(\vec{x})$ на единицу, если все $\mu_1(\vec{x}), \dots, \mu_N(\vec{x})$ также нормированы;
- аддитивный подход $\mu_D(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu_i(\vec{x})$;
- мультипликативный подход $\mu_D(\vec{x}) = \prod_{i=1}^N \alpha_i \mu_i(\vec{x})$.

Как отмечается в [2], аддитивная и мультипликативные стратегии свертки не всегда позволяют получить точку оптимума, удовлетворяющую всем выдвигаемым требованиям, особенно требованию принадлежности точки оптимума множеству Парето. В этом случае необходимо использовать максиминную стратегию. Однако в случае, когда функции желательности не пересекаются, использование максиминной свертки может привести к неудовлетворительному результату. В этом случае необходимо использовать аддитивный или мультипликативный подходы.

Применим теорию нечетких множеств для решения задачи структурно-параметрической оптимизации системы терморегулирования (СТР)

телекоммуникационного спутника. Для отвода теплоты необходимы активные СТР с принудительной прокачкой теплоносителя. В активной СТР насос прокачивает теплоноситель через участок теплосбора, где он воспринимает теплоту от приборов, и переносит ее к месту теплосброса, где теплота отводится в окружающее пространство. Далее теплоноситель вновь поступает на вход в насос. В космосе отвод теплоты осуществляется излучением посредством радиационных теплообменников (РТО). В работе [3] сделан вывод о том, что в спутниках с большим тепловыделением наиболее предпочтительным является использование СТР на базе двухфазных контуров теплопереноса (ДФ СТР), которая имеет меньшую массу, а также обладает преимуществами по энергопотреблению, точности термостабилизации в сравнении с системой на базе однофазного контура теплопереноса. В ДФ СТР на участке теплосбора теплоноситель кипит, изменяет свое агрегатное состояние. В РТО теплоноситель конденсируется. Вследствие того, что скрытая теплота парообразования во много раз превосходит теплоемкость, а коэффициенты теплоотдачи при пузырьковом кипении и конденсации значительно превышают коэффициенты теплоотдачи в однофазном теплоносителе и достигается выигрыш по массе, энергопотреблению, точности термостабилизации ДФ СТР в сравнении с системой на базе однофазного контура теплопереноса.

На рис. 1 изображена принципиальная схема перспективного телекоммуникационного спутника. Приборы, от которых необходимо отводить теплоту, размещены с двух сторон двух совершенно идентичных внутренних приборных панелей (ПП). Каждая ПП разбита на три зоны (рис. 2), которые различаются составом приборов и, соответственно, температурой термостабилизации. Все приборы, установленные на ПП, имеют постоянное тепловыделение в течении всего времени полета.

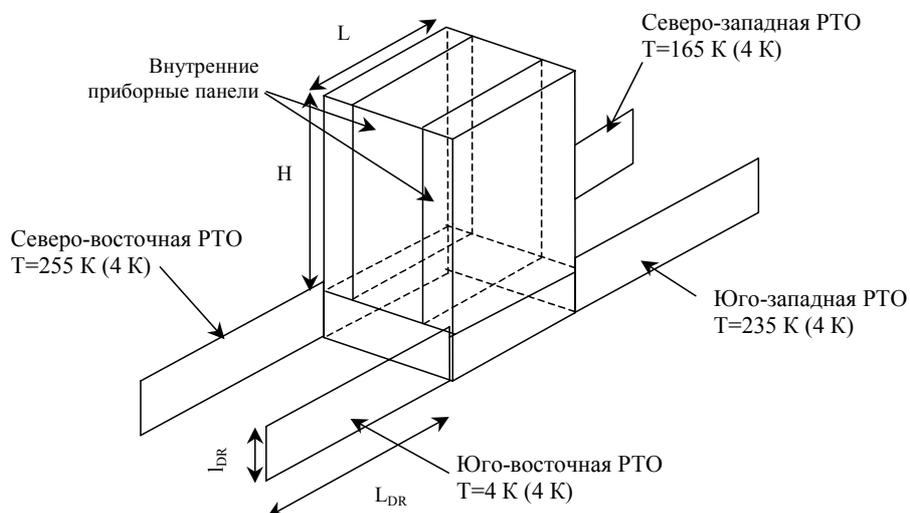


Рис. 1. Принципиальная схема перспективного телекоммуникационного спутника фирмы THALES ALENIA SPACE

Техническое задание на систему терморегулирования:

- температура термостатирования (см. рис. 2):
 - приборы ЕРС – +5 °С...+50 °С;
 - приборы ТWT и ОМУХ – +40 °С...+70 °С;
- общее тепловыделение – $Q = 13$ кВт;

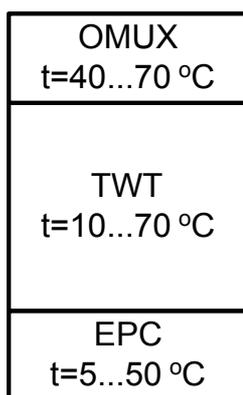


Рис. 2. Схема размещения приборов на внутренней ПП с температурами термостабилизации каждой зоны

- надежность должна быть выше 0,9;
- расстояние теплопереноса – 50 м;
- условия теплоотвода, характеризуются условной температурой окружающей среды (см. рис. 1):

- «горячая» орбита:
 - юго-восточный PTO – 4 К;
 - юго-западный PTO – 235 К;
 - северо-восточный PTO – 255 К;
 - северо-западный PTO – 165 К;
- «холодная» орбита:
 - юго-восточный PTO – 4 К;
 - юго-западный PTO – 4 К;
 - северо-восточный PTO – 4 К;
 - северо-западный PTO – 4 К;

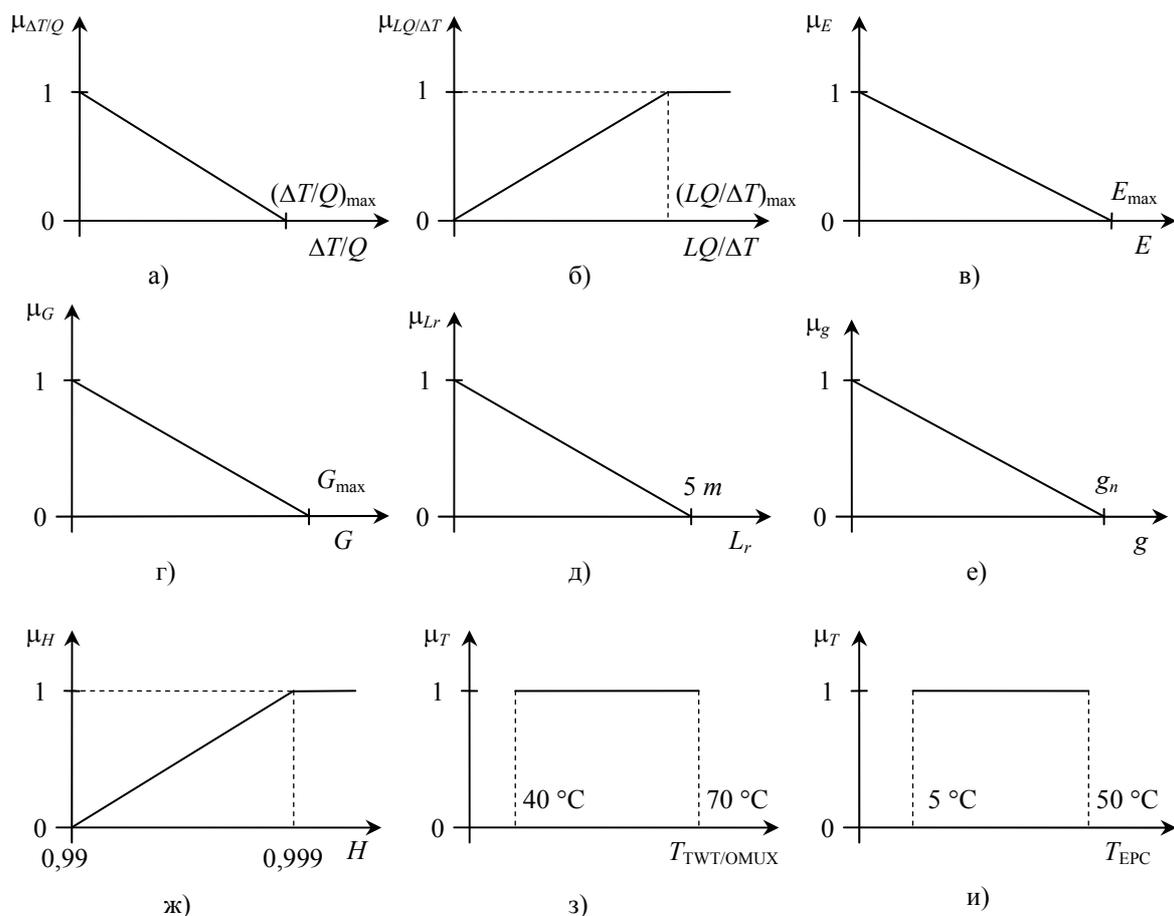
- ширина панели PTO – 1,65 м;
- длина панели PTO не должна превышать 5 м.

В процессе структурно-параметрического синтеза системы терморегулирования используем следующие показатели и критерии эффективности:

- 1) термическое сопротивление $\frac{\Delta T}{Q}$ должно быть минимальным;
- 2) теплопроводная способность $\frac{QL}{\Delta T}$ – максимальна;
- 3) энергопотребление на собственные нужды E – минимально;
- 4) температура приборов EPC, TWT, OМУХ не должна выходить за заданные в техническом задании параметры;
- 5) длина PTO L_r не должна превышать 5 м;
- 6) вес системы G должен быть минимальным;
- 7) влияние гравитации должно не сильно влиять на результаты испытания на Земле;
- 8) надежность H должна быть максимальной.

На рис. 3 представлены функции желательности для перечисленных выше показателей и критериев эффективности. Так как условие нахождения температур приборов в заданном диапазоне безусловно должно выполняться для всех альтернативных вариантов системы, то матрицу приоритетов для поиска коэффициентов относительной важности строим только для следующих показателей:

- 1) термическое сопротивление $(\mu_{\Delta T/Q} = 1 - \frac{\Delta T/Q}{(\Delta T/Q)_{\max}}, (\Delta T/Q)_{\max} = 5 \frac{\text{К}}{\text{кВт}});$
- 2) теплопроводная способность $(\mu_{QL/\Delta T} = \frac{L \cdot Q/\Delta T}{(L \cdot Q/\Delta T)_{\max}}, (L \cdot Q/\Delta T)_{\max} = 50 \frac{\text{м} \cdot \text{кВт}}{\text{К}});$
- 3) энергопотребление на собственные нужды $(\mu_E = 1 - \frac{E}{E_{\max}}, E_{\max} = 1 \text{ кВт});$

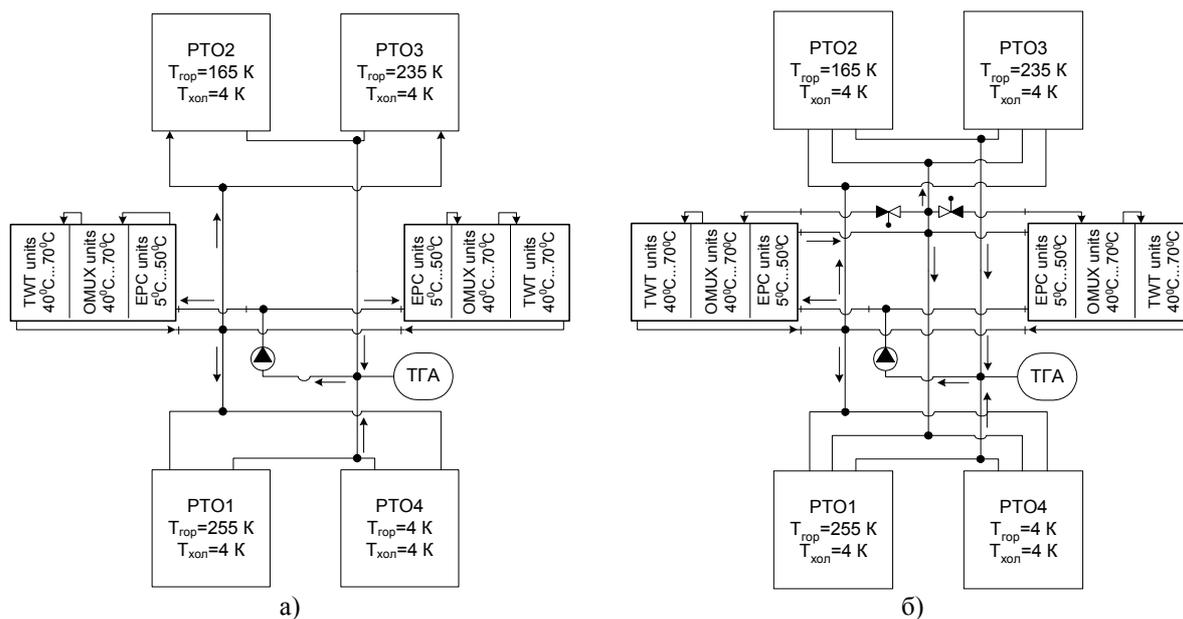


a – термическое сопротивление; *б* – теплопроводная способность;
в – энергопотребление на собственные нужды; *г* – вес; *д* – длина панели радиатора-излучателя;
е – возможность испытания на Земле; *ж* – надежность;
з – температура приборов TWT и OМУХ; *и* – температура приборов EPC

Рис. 3. Функции желательности для показателей эффективности

- 4) длина радиатора-излучателя ($\mu_{L_r} = 1 - \frac{L_r}{(L_r)_{\max}}$, $(L_r)_{\max} = 5$ м);
- 5) вес системы (функция желательности $\mu_G = 1 - \frac{G}{(G)_{\max}}$, $(G)_{\max} = 400$ кг);
- 6) влияние гравитации на результаты испытаний на Земле ($\mu_g = 1$ – влияние не существенное, $\mu_g = 0,75$ – влияние слабое, $\mu_g = 0,5$ – влияние достаточно существенное, $\mu_g = 0$ – влияние существенное);
- 7) надежность ($\mu_H = \frac{1}{0,099} H - \frac{0,9}{0,099}$).

Нормализованные коэффициенты относительной важности («веса») w_{TCS_i} для показателей эффективности определены с использованием методики Т. Саати [2] и равны: $\vec{w}_{TCS} = (0,064 \ 0,054 \ 0,095 \ 0,209 \ 0,184 \ 0,037 \ 0,357)$. То есть, наибольший приоритет имеют: длина радиатора-излучателя – 0,209, вес – 0,184, надежность – 0,357.



а – однофазная и двухфазная система с параллельным соединением панелей и радиаторов-излучателей;
 б – двухфазная система с параллельным соединением панелей и радиаторов-излучателей и выделением
 секции радиатора-излучателя для приборов EPC

Рис. 4. Альтернативные схемы системы терморегулирования

При структурно-параметрической оптимизации рассматриваем следующие варианты системы: однофазная и двухфазная СТР с параллельным соединением панелей и РТО (рис. 4а), двухфазная СТР с параллельным соединением панелей и РТО и выделением в каждом радиационном теплообменнике секции для отвода теплоты только от приборов EPC (рис. 4б). Во всех вариантах теплоноситель – аммиак.

В первых двух схемах теплоноситель прокачивается насосом через внутренние панели, соединенные параллельно. Затем на выходе из панелей поток объединяется и направляется в радиационные теплообменники, которые также соединены параллельно. После РТО поток направляется на вход в насос. В третьей схеме (рис. 4б) в составе РТО отдельно выделены секции для термостатирования приборов зоны EPC жидким теплоносителем. На выходе из зоны EPC поток разделяется: одна часть поступает в секцию EPC радиационного теплообменника, другая – к приборам TWT и OMUX. Теплоноситель, проходя через зоны TWT и OMUX, отбирает теплоту от приборов, установленных в этих зонах и испаряется. На выходе из обеих приборных панелей двухфазный поток смешивается и поступает в секции РТО, предназначенные для отвода теплоты только от приборов зон TWT и OMUX. После смешения жидкость поступает на вход в насос. Благодаря секции термостатирования приборов EPC температуру насыщения удалось поднять, без снижения паросодержания на выходе из приборных панелей. В зоне EPC теплоноситель не нагревался выше 36 °С (находился в однофазном состоянии). Однако, так как в зону приборов TWT и OMUX подавался не весь аммиак, а только его часть, паросодержание на выходе из приборных панелей удалось поднять до 0,8. При этом температура насыщения поддерживалась на уровне 56 °С. В результате более высокой температуры насыщения, более равномерного профиля температуры РТО, площадь, вес РТО и термическое сопротивление системы должны уменьшиться, теплотранспортная способность возрасти в сравнении с вариантом системы, представленной на рис. 4а. При структурно-параметрической

оптимизации, наряду с различными схемами циркуляции теплоносителя также рассматривалось два типа РТО – со встроенным трубопроводом и на тепловых трубах (ТТ).

Радиационный теплообменник на тепловых трубах имеет больший вес по сравнению с радиатором-излучателем со встроенным трубопроводом, однако он более надежен. Причина в том, что в случае пробоя метеоритом встроенного трубопровода система выйдет из строя из-за потери теплоносителя, в то время как пробой одной или даже нескольких тепловых труб не приведет к потере теплоносителя в контуре циркуляции системы. Надежность многосекционного радиационного теплообменника определяется по формуле [5]

$$P_r = \sum_{a=z_0}^z \frac{z!}{a!(z-a)!} (1-P)^{z-a} P^a,$$

где P – надежность секции радиатора-излучателя; z – общее число секций радиатора-излучателя; z_0 – число секций, не пробитых за ресурс.

Для РТО со встроенным трубопроводом $z=1$ и $z_0=1$. Количество тепловых труб (секций) в РТО равно порядка 20. Теплотранспортная способность тепловых труб выбрана такой, что даже в случае выхода из строя в результате пробоя 5 тепловых труб, радиатор-излучатель останется работоспособным. То есть, $z=20$ и $z_0=15$. Поэтому, если принять, что надежность или встроенного трубопровода или тепловой трубы одинакова и равна 0,99, то надежность радиатора-излучателя будет: для случая встроенного трубопровода – 0,99, для РТО на тепловых трубах – 0,999.

Таким образом, рассматривается 6-ть альтернативных вариантов системы:

- вариант 1 – однофазная СТР (рис. 4а) с РТО со встроенным трубопроводом;
- вариант 2 – однофазная СТР (рис. 4а) с РТО на тепловых трубах;
- вариант 3 – двухфазная СТР (рис. 4а) с РТО со встроенным трубопроводом;
- вариант 4 – двухфазная СТР (рис. 4а) с РТО на тепловых трубах;
- вариант 5 – двухфазная СТР (рис. 4б) с РТО со встроенным трубопроводом;
- вариант 6 – двухфазная СТР (рис. 4б) с РТО на тепловых трубах.

Результаты вычислений интегральных частных показателей эффективности для каждого альтернативного варианта системы представлены в табл. 1. Функции желательности для каждого показателя эффективности и каждой альтернативы с учетом «веса» показателей приведены в табл. 2. Как следует из представленных результатов, функции желательности частных показателей эффективности не пересекаются. Поэтому глобальный показатель эффективности построен на базе аддитивного подхода, то есть $\mu_D(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x)\mu_i(x)$ и представлен в последней колонке табл. 2.

Таблица 1

Интегральные частные показатели эффективности для 6-ти вариантов системы

Вариант	G , кг	L_r , м	E , Вт	H	ΔT , К	$\Delta T/Q$, К/кВт	$LQ/\Delta T$, м·кВт/К
1	301,0	4,3	388,0	0,990	27,7	2,1	23,5
2	388,0	4,9	231,0	0,999	27,7	2,1	23,5
3	244,6	3,8	28,9	0,990	40,1	3,1	16,2
4	312,5	3,9	23,2	0,999	40,1	3,1	16,2
5	250,5	3,7	82,6	0,990	19,5	1,5	33,3
6	318,3	3,8	66,4	0,999	19,5	1,5	33,3

Таблица 2

Функции желательности для частных показателей эффективности с учетом «веса» каждого показателя и глобальный показатель эффективности для 6-ти вариантов системы

Вариант	μ_G	μ_{Lr}	μ_E	μ_H	$\mu_{\Delta T/Q}$	$\mu_{LQ/\Delta T}$	μ_D
1	0,0450	0,0290	0,058	0,18	0,037	0,026	0,41
2	0,0055	0,0042	0,073	0,36	0,037	0,026	0,54
3	0,0710	0,0520	0,093	0,18	0,025	0,018	0,47
4	0,0400	0,0470	0,093	0,36	0,025	0,018	0,61
5	0,0690	0,0550	0,087	0,18	0,045	0,036	0,50
6	0,0380	0,0500	0,089	0,36	0,045	0,036	0,64

В результате анализа определено, что решение *D* соответствует максимуму функции желательности, то есть системе на базе двухфазного контура теплопереноса с РТО на тепловых трубах и выделением в каждом радиационном теплообменнике секции для отвода теплоты от приборов ЕРС (вариант 6). Несмотря на то, что этот вариант проигрывает некоторым другим вариантам по массе, длине радиационного теплообменника, по другим показателям (надежность, термическое сопротивление, теплопроводная способность) он имеет существенное преимущество, что и обусловило его выбор.

Таким образом, в результате применения теории нечетких множеств был сформирован глобальный показатель эффективности, учитывающий все частные показатели, имеющие различную природу. С использованием глобального показателя эффективности была выполнена структурно-параметрическая оптимизация двухфазной системы терморегулирования перспективного телекоммуникационного спутника. Предложенный глобальный показатель эффективности позволил разработать структурную схему системы, определить характеристики элементов системы, которые в максимальной степени удовлетворяют всем выдвинутым выше частным показателям эффективности.

Список литературы: 1. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338-358.
 2. *Севастьянов П.В.* Многокритериальная идентификация и оптимизация технологических процессов / П.В. Севастьянов, Н.В. Туманов. – Мн.: Наука і тэхніка, 1990. – 224 с. – Библиогр. с.: 215-223.
 3. *Никонов А.А.* Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов / А.А. Никонов, Г.А. Горбенко, В.Н. Блинков. – М.: Машиностроение, 1991. – 302 с. – Библиогр. с.: 286-295. 4. *Фаворский О.Н.* Вопросы теплообмена в космосе / О.Н. Фаворский, Я.С. Каданер. – М.: Высшая школа, 1967. – 248 с. – Библиогр. с.: 243-246.

© Гакал П.Г., 2010

Поступила в редколлегию 15.02.10