

УДК 629.78.018:681.5

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕПЛОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. В. Шевляков¹, И. А. Выхристюк¹, А. Г. Верхогляд¹, В. И. Халиманович², В. В. Христинич²

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН)
Российская Федерация, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41.

E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

² ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: office@iss-reshetnev.ru

Тепловакуумные испытания являются важной составляющей предполетной отработки космических аппаратов. Представлена система управления тепловыми потоками при проведении тепловакуумных испытаний с количеством контрольных точек до 750 и управляющих воздействий до 380 (каналов). Она обеспечивает анализ нештатных ситуаций и автоматическое управление алгоритмом испытаний, контролирует температуру различных точек изделия в диапазоне от -150 до $+150$ °С. Представлен разработанный алгоритм автоматического вывода испытываемого объекта на заданное температурное распределение. Результаты опытных испытаний алгоритма свидетельствуют о его работоспособности.

Ключевые слова: космический аппарат, предполетные испытания, тепловакуумные испытания, автоматизация.

AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF HEAT FLUXES AT THERMOVACUUM TESTING OF SPACECRAFTS

A. V. Shevlyakov¹, I. A. Vykhristyuk¹, A. G. Verkhoglyad¹,
V. I. Khalimanovich², V. V. Hristich²

¹Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (TDI SIE SB RAS),
41, Russkaya str., Novosibirsk, 630058, Russian Federation

E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

²JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation

E-mail: office@iss-reshetnev.ru

Thermovacuum tests are an important component for preflight of spacecrafts working off. Control system of heat fluxes at thermovacuum tests with quantity of control points up to 750 and operating influences up to 380 (channels) is reported. This system provides the analysis of emergency situations and automatic control of testing algorithm, as well as, supports the temperature of article various points in the range from -150 up to $+150$ °C. Algorithm for automatic obtaining specified temperature distribution is presented. Results of pilot tests of algorithm testify to its working capacity.

Keywords: spacecraft, preflight tests, thermovacuum test, automation.

Современная стратегия экспериментальной отработки космических аппаратов (КА) основывается преимущественно на наземной отработке систем и частей КА. При этом имитация штатных условий эксплуатации производится в наиболее полном возможном объеме [1]. Тепловакуумные испытания (ТВИ) являются важной составляющей предполетной отработки КА [2]. Во время ТВИ имитируются такие условия космоса, как вакуум, солнечный поток, резкие перепады температуры по поверхности КА.

Современные системы для проведения ТВИ имеют возможность использования сотен устройств подвода

мощности (УПМ) и датчиков температуры, что делает необходимым автоматизацию задачи получения определенного температурного режима на испытываемом КА.

Представленная система предназначена для проведения различных тепловакуумных испытаний с количеством контрольных точек до 750 и управляющих воздействий до 380 (каналов). Работы по разработке автоматизированной системы велись в рамках создания горизонтальной вакуумной установки ГВУ-600 для ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева». Система осуществляет автоматическое управление ходом испытаний в крупноразмерной горизонтальной

вакуумной камере ГВУ-600 с объёмом более 600 м³ (рис. 1), обеспечивает анализ нештатных ситуаций и автоматическое управление алгоритмом испытаний, контролирует температуру различных точек изделия в диапазоне от -150 до +150 °С, позволяет проводить в автоматическом режиме один из видов тепловакуумных испытаний: термобалансные или термостатические.

Термобалансные испытания подразумевают подачу постоянной мощности независимо от температуры либо релейное управление мощностью в заданном температурном диапазоне.

Термостатические (термоциклические) тепловакуумные испытания заключаются в последовательном выводе испытываемого КА на определенные температурные режимы (ТР) и поддержание заданных ТР в течение требуемого времени. Под температурным режимом подразумевается такое состояние объекта, при котором температура, измеряемая в контролируемых точках, существенно не меняется со временем.



Рис. 1. Крупноразмерная горизонтальная вакуумная камера ГВУ-600 с объёмом более 600 м³

Задача получения заданного температурного режима. Сложность проведения испытаний заключается в том, что любой источник тепла в общем случае оказывает влияние на любую точку объекта, вызывая изменение температуры на ней. Поэтому практически невозможно перейти к конечному числу одноконтурных регуляторов.

В общем случае существует N управляемых УПМ и T датчиков, фиксирующих температуру в интересующих точках испытываемого изделия. Влияние изменения подводимой мощности на изменение температуры в каждой точке неизвестно.

$F(n_1, n_2, \dots, n_N) = (t_1, t_2, \dots, t_T)$ – неизвестная зависимость ТР от значений подводимых мощностей.

Входными данными являются: исходный ТР $(t_1^{[0]}, t_2^{[0]}, \dots, t_T^{[0]})$, исходное значение подводимых мощностей $(n_1^{[0]}, n_2^{[0]}, \dots, n_N^{[0]})$, требуемый ТР $(\tilde{t}_1^{[L]}, \tilde{t}_2^{[L]}, \dots, \tilde{t}_T^{[L]})$ и точность δt получения ТР. Искомым является вектор значений подводимых мощностей $(n_1^{[L]}, n_2^{[L]}, \dots, n_N^{[L]})$, при котором получается ТР $(t_1^{[L]}, t_2^{[L]}, \dots, t_T^{[L]})$, отличающийся от требуемого не более чем на величину δt в каждой контролируемой точке:

$$F(n_1^{[L]}, n_2^{[L]}, \dots, n_N^{[L]}) = (t_1^{[L]}, t_2^{[L]}, \dots, t_T^{[L]}),$$

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad |\tilde{t}_i^{[L]} - t_i^{[L]}| \leq \delta t.$$

Алгоритм управления тепловыми потоками. Решение задачи основано на нахождении приращения F в текущей точке, при изменении мощности на каждом УПМ на известную величину $\Delta n_i, i \in \{1, 2, \dots, N\}$, и вычислении вектора коэффициентов (k_1, k_2, \dots, k_N) в предположении, что F локально линейна, а точнее, что

$$F(n_1 + k_1 \Delta n_1, n_2 + k_2 \Delta n_2, \dots, n_N + k_N \Delta n_N) - F(n_1, n_2, \dots, n_N) =$$

$$= k_1 \cdot (F(n_1 + \Delta n_1, n_2, \dots, n_N) - F(n_1, n_2, \dots, n_N)) +$$

$$+ k_N \cdot (F(n_1, n_2, \dots, n_N + \Delta n_N) - F(n_1, n_2, \dots, n_N)). \quad (1)$$

Реализация алгоритма состоит в последовательном изменении мощности на каждом УПМ на известную величину и ожидании выхода системы на ТР. Для ожидания ТР используется три параметра – время ожидания реакции системы, время ожидания баланса и допуск на баланс. Время реакции системы определяет интервал, в течение которого после изменения мощности не контролируется выход на ТР. Допуск на баланс задает минимальное отклонение температуры в любой контролируемой точке за время, меньшее времени ожидания баланса, при котором констатируется температурная нестабильность системы. Ожидание ТР заканчивается, если за время ожидания баланса температура во всех точках изменилась на величину, не превышающую допуска на баланс.

После получения ТР для текущего УПМ мощность на нем возвращается в исходное состояние и меняется мощность следующего. В результате этого процесса получается набор ТР:

$$F(n_1^{[0]} + \Delta n_1, n_2^{[0]}, \dots, n_N^{[0]}) = (t_1^{[1]}, t_2^{[1]}, \dots, t_T^{[1]})$$

$$\dots$$

$$F(n_1^{[0]}, n_2^{[0]}, \dots, n_N^{[0]} + \Delta n_N) = (t_1^{[N]}, t_2^{[N]}, \dots, t_T^{[N]}), \quad (2)$$

где $t_j^{[i]}$ – температура, зарегистрированная на j -м датчике при изменении мощности на i -м УПМ. Из (1) и (2) получаем систему из T уравнений с N неизвестными:

$$\begin{pmatrix} t_1^{[1]} - \tilde{t}_1^{[L]} & t_1^{[2]} - \tilde{t}_1^{[L]} & \dots & t_1^{[N]} - \tilde{t}_1^{[L]} \\ t_2^{[1]} - \tilde{t}_2^{[L]} & t_2^{[2]} - \tilde{t}_2^{[L]} & \dots & t_2^{[N]} - \tilde{t}_2^{[L]} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_T^{[1]} - \tilde{t}_T^{[L]} & t_T^{[2]} - \tilde{t}_T^{[L]} & \dots & t_T^{[N]} - \tilde{t}_T^{[L]} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1^{[0]} - \tilde{t}_1^{[L]} \\ t_2^{[0]} - \tilde{t}_2^{[L]} \\ \vdots \\ t_T^{[0]} - \tilde{t}_T^{[L]} \end{pmatrix} \quad (3)$$

После успешного решения системы (3) [3] значение подводимых мощностей устанавливается в

$$\begin{aligned} & (n_1^{[L]}, n_2^{[L]}, \dots, n_N^{[L]}) = \\ & = (n_1^{[0]} + k_1 \Delta n_1, n_2^{[0]} + k_2 \Delta n_2, \dots, n_N^{[0]} + k_N \Delta n_N) \end{aligned}$$

и ожидается выход системы на ТР $(t_1^{[L]}, t_2^{[L]}, \dots, t_T^{[L]})$.

В общем случае (исходя из практического предположения, что $T \geq N$) система (3) переопределена, т. е. любое решение имеет невязку, которая связана с нелинейностью F , неточностью определения выхода системы на ТР, а также с погрешностью измерения температуры, нелинейностью УПМ и неконтролируемым подводом мощности. Еще одним фактором, влияющим на наличие и величину невязки, является теоретическая достижимость требуемого ТР. Система датчиков и УПМ может быть сконфигурирована так, что запрашиваемый ТР не может быть получен ни при каких значениях мощностей.

Невязку, вызванную нелинейностью F , можно уменьшать путем последовательного применения вышеописанного алгоритма, добиваясь на каждом этапе минимизации невязки и беря в качестве исходного состояния для следующего этапа состояние, полученное на текущем.

Результаты. Нами проведены опытные испытания алгоритма управления. В результате получены данные, подтверждающие работоспособность алгоритма.

В эксперименте было задействовано семь каналов мощности (рис. 2) и пять контрольных точек измерения температуры (рис. 3). В соответствии с регламентом описанного выше алгоритма сначала было проведено последовательное изменение мощности на каждом УПМ на известную величину с ожиданием выхода системы на ТР. После получения ТР для текущего УПМ мощность на нем возвращалась в исходное состояние и менялась мощность следующего (правая часть графиков на рис. 2 и 3 до времени 16.00). Затем в соответствии с (3) устанавливались вычисленные значения подводимых мощностей и ожидался выход системы на ТР (правая часть графиков на рис. 2 и 3 после времени 16.00). Как видно из этих рисунков, выход на заданный ТР успешно осуществлен в автоматическом режиме.

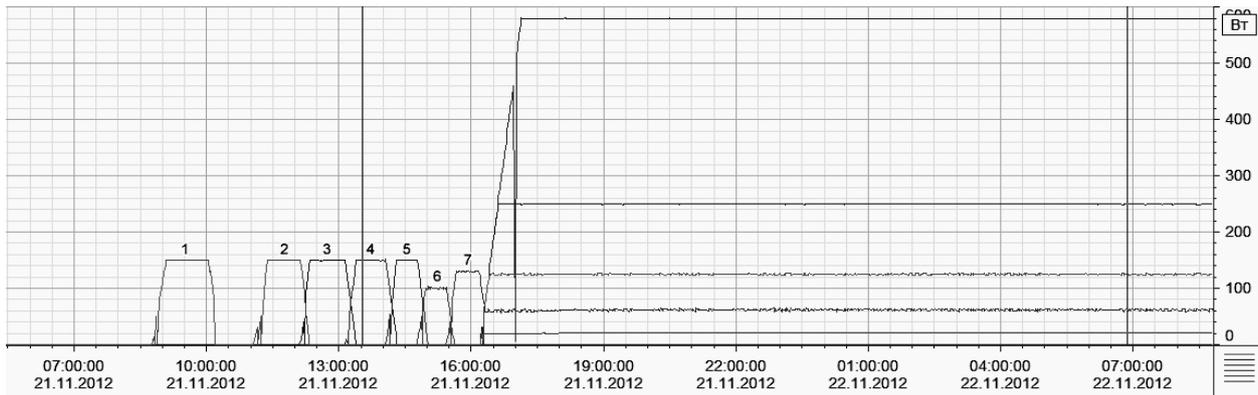


Рис. 2. Графики зависимости мощности от времени для семи УПМ, участвующих в эксперименте по проверке действия алгоритма

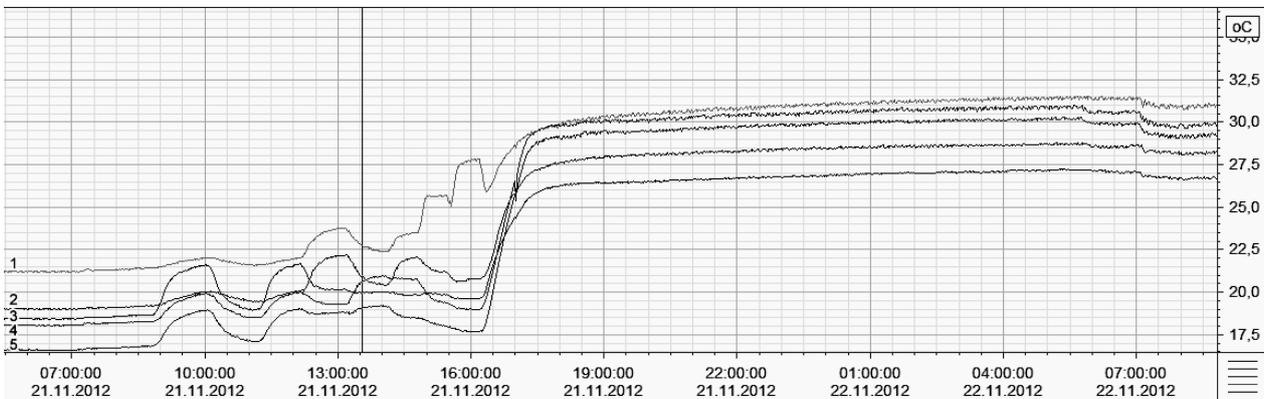


Рис. 3. Графики зависимости температуры от времени для пяти контролируемых точек, используемых в эксперименте по проверке действия алгоритма

В работе представлена система управления тепловыми потоками при проведении тепловакуумных (термобалансных или термостатических) испытаний космических аппаратов с количеством контрольных точек до 750 и управляющих воздействий до 380 (каналов). Она обеспечивает анализ нештатных ситуаций и автоматическое управление алгоритмом испытаний, контролирует температуру различных точек изделия в диапазоне от -150 до $+150$ °С. Приведен разработанный алгоритм автоматического вывода испытываемого объекта на заданное температурное распределение. Результаты опытных испытаний алгоритма свидетельствуют о его работоспособности.

Библиографические ссылки

1. Александровская Л. Н. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем. М. : Логос, 2003. 736 с.
2. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов / В. А. Афанасьев [и др.] ; под ред. Н. В. Холодкова. М. : Изд-во МАИ, 1994. 210 с.

3. Калиткин Н. Н. Численные методы. М. : Наука, 1978. 512 с.

References

1. Aleksandrovskaya L. N. *Teoreticheskiye osnovy ispitanii i eksperemental'naya otrabotka slozhnih tehnikeskikh sistem* (Theoretical bases of testing of sophisticated technical systems and their experimental working off). Moscow, Logos Publ., 2003. 736 p.
2. Afanasiev V. A., Barsukov V. S., Gofin M. Ya., Zaharov Yu. V., Strelchenko A. N., Shalunov N. P. *Eksperemental'naya otrabotka kosmicheskikh letatel'nyh apparatov* (Experimental working off for space aircrafts). Edited N. V. Kholodkova. Moscow, MAI Publ., 1994. 210 p.
3. Kalitkin N. N. *Chislennyye metody* (Numerical methods). Moscow, Nauka Publ., 1978. 512 p.

© Шевляков А. В., Выхристюк И. А.,
Верхогляд А. Г., Халиманович В. И.,
Христич В. В., 2014