

УДК 629.78.048.3 (075.8)

К.С. ЕПИФАНОВ, Д.В. ЧАЙКА, В.И. РУЗАЙКИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

УПРАВЛЕНИЕ СТАРТОВОЙ СИСТЕМОЙ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ
КОСМИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрены проблемы, возникающие при синтезе системы автоматического регулирования, предназначенной для управления стартовой системой кондиционирования ракетно-космического комплекса и описаны пути их решения.

система автоматического регулирования, синтез системы управления, система кондиционирования, стартовый комплекс

Введение

Одним из важных условий запуска спутников является обеспечение их температурных режимов в период сборки, транспортировки и предстартовой подготовки. Для этого в состав наземных комплексов и стартового оборудования входят воздушные системы термостатирования. Данная система обеспечивает подачу воздуха определенной температуры и влажности в отсеки ракетносителя. Принципиальная схема системы термостатирования (СТС) ракетносителя (РН) «Циклон-4» и головного блока

(ГБ) приведена на рис. 1. Блок компрессоров (БК) нагнетает воздух в воздухоохладители блока системы кондиционирования воздуха (СКВ), где он охлаждается и осушается. Теплота, отводимая от воздуха в СКВ, передается жидкому хладагенту. Циркуляция теплоносителя обеспечивается насосом Н, охлаждение – работой холодильной машины ХМ. Заданная температура теплоносителя на входе в СКВ поддерживается изменением расхода теплоносителя через байпас рекуперативного теплообменника АТ2 при помощи крана КР. Управление положением крана осуществляется по показанию датчика температуры ДТ3.

Температура воздуха на входе в ГБ и приборные отсеки РН поддерживается электронагревателями ЭН1 и ЭН2. Управление мощностью нагревателей осуществляется по показаниям датчиков температуры ДТ1 и ДТ2.

Для управления нагревателем ЭН1 и ЭН2, а также краном КР используются пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы.

Постановка задачи исследования. Синтез САР СТС осложняется как предъявляемыми к системе термостатирования требованиями по точности поддержания температуры и высокой сухости воздуха на входе в ГБ и РН, так и свойствами объекта регулирования – большой инерционностью, возможно-

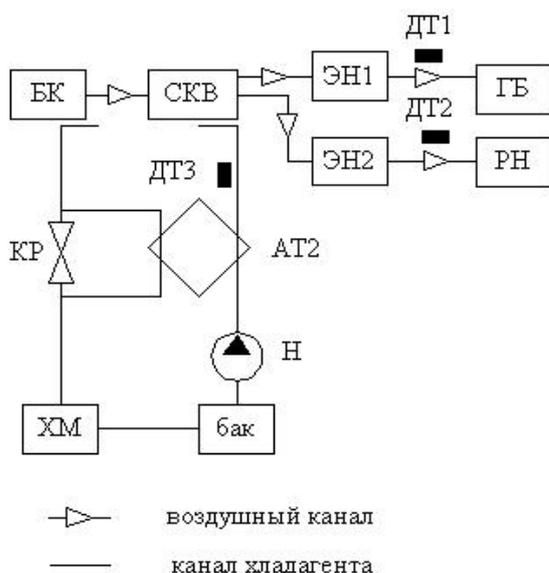


Рис. 1. Принципиальная схема системы термостатирования

стью выхода из строя при замерзании сконденсировавшейся влаги в СКВ и т. п. Известные методики оценки качества регулирования, например использование диаграммы Вышнеградского [1], неприменимы из-за того, что математическая модель СТС представляет собой систему обыкновенных дифференциальных и алгебраических уравнений большого порядка. Поэтому необходимо модифицировать подход к описанию СТС для того, чтобы математическая модель СТС была пригодна для применения известных методик синтеза САР.

Методика определения характеристик регуляторов

Определение характеристик регуляторов температуры воздушных каналов. Для использования ПИД-регуляторов в системе управления нагревателями ЭН1 и ЭН2 необходимо подобрать их коэффициенты таким образом, чтобы обеспечить выполнение технического задания по качеству регулирования температуры.

Подбор коэффициентов осуществляется в течении ряда этапов, в течении которых:

- 1) создается математическая модель, описывающая воздушные каналы системы от нагревателей ЭН1 и ЭН2 до датчиков температуры ДТ1 и ДТ2 соответственно;
- 2) переходная характеристика математической модели воздушного канала аппроксимируется переходной характеристикой динамического звена;
- 3) при помощи математического аппарата теории автоматического управления определяются характеристики системы управления нагревателя.

Математическая модель строилась методом идеализированных элементов [2]. Идеализированные элементы - это геометрические образы уравнений гидродинамики и теплопередачи и характеризуют способность узла или агрегата системы накапливать теплоноситель, изменять его энергию, импульс, способность передавать теплоту между теп-

лоносителем и поверхностью узла или агрегата, или между поверхностями узлов и агрегатов. Совокупность идеализированных элементов образует нодализационную схему, которая является геометрическим образом системы уравнений, описывающей процессы теплообмена в контуре теплопередачи. На рис. 2 приведен топологический образ математической модели воздушного канала, соединяющего нагреватель с датчиком температуры. Воздух в нагревателе моделируется контрольным объемом 1, воздух в трубопроводах – контрольными объемами 2 – 20. Теплоемкостные свойства спирали нагревателя описываются тепловым узлом 1, теплоемкостные свойства стенок трубопроводов – тепловыми узлами 2 – 20. Температура датчика температуры принимается равной температуре контрольного объема 21.

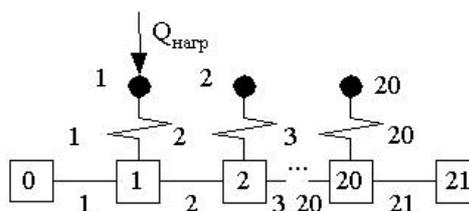


Рис. 2. Математическая модель воздушного канала

Воспользовавшись сформированной математической моделью, проведем численные эксперименты, определив показания датчиков температуры в переходном процессе. Возмущающим воздействием будет ступенчатая функция мощности нагревателя. Результат одного из экспериментов приведен на рис. 3.

Используем для описания свойств воздушного канала уравнение апериодического звена второго порядка [1]:

$$T_2^2 \frac{d^2 x_2}{d\tau^2} + T_1 \frac{dx_2}{d\tau} + x_2 = kx_1. \quad (1)$$

где x_1 – входная величина (в данном случае мощность нагревателя);

x_2 – выходная величина (в данном случае показания датчика ДТ1 или ДТ2);

T_2, T_1, k – коэффициенты.

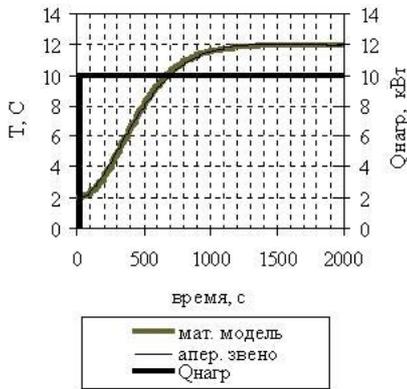


Рис. 3. Переходная характеристика канала головного блока

Идентифицируем математическую модель аperiodического звена второго порядка на основании данных проведенных численных экспериментов. В качестве критерия близости переходных характеристик математической модели воздушного канала и аperiodического звена второго порядка примем сумму квадратов разностей показаний датчиков температур, взятых в пределах времени расчета с заданным шагом.

Пример соответствия переходных характеристик математических моделей воздушного канала приведены на рис. 3.

Воспользуемся полученными моделями воздушных каналов системы как аperiodического звена второго порядка для определения коэффициентов ПИД-регуляторов.

Принципиальная схема системы управления нагревателем приведена на рис. 4. Входной величиной для регулятора является величина $T = T_{от} - T_{уст}$, где $T_{уст}$ – заданное значение температуры на входе в головной блок или приборные отсеки, $T_{ДТ}$ – показания датчика ДТ1 для канала головного блока или ДТ2 для канала приборных отсеков. На основании входного параметра регулятор формирует выходной сигнал I , передаваемый в исполнительный механизм

(ИМ). Исполнительный механизм, в свою очередь, задает электрическую мощность нагревателя $Q_{нагр}$. На температуру на выходе из воздушного канала, кроме мощность нагревателя, оказывают влияние параметры воздуха и его массовый расход на входе в канал (величины представлены в виде внешнего воздействия F на рис. 4).

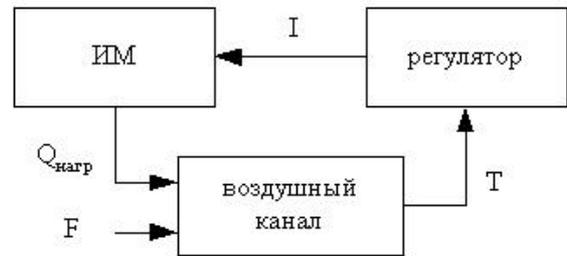


Рис. 4. Блок-схема системы автоматического регулирования нагревателя

Так как технические требования к регулированию возможно удовлетворить без применения дифференцирующей составляющей, примем $k_d = 0$, что упростит анализ. Тогда уравнение ПИД-регулятора примет вид:

$$\frac{dI}{d\tau} = -\left(k_n \cdot \frac{dT}{d\tau} + k_u \cdot T\right), \quad (2)$$

где k_n, k_u, k_d – пропорциональный, интегрирующий и дифференцирующий коэффициенты соответственно. Общий знак ‘-’ вынесен за скобки для того, чтобы значения коэффициентов k_n, k_u, k_d были положительными.

Уравнение исполнительного механизма имеет вид:

$$Q_{нагр} = k_{им} \cdot (I - I_{\min}), \quad (3)$$

где $I_{\min}, k_{им}$ – коэффициенты исполнительного механизма, определяемые его конструкцией.

Определим характер изменения показаний датчика температуры от изменения внешних воздействий, рассмотрев систему уравнений (1), (2), (3). В результате получим:

$$T_2^2 \frac{d^3 T}{d\tau^3} + T_1 \frac{d^2 T}{d\tau^2} + (1 + k \cdot k_{им} \cdot k_n) \cdot \frac{dT}{d\tau} +$$

$$+ k \cdot k_{um} \cdot k_u \cdot T = \sum_{i=1}^N k_{f_i} \cdot \frac{dF_i}{d\tau}. \quad (4)$$

Воспользуемся уравнением (4) для анализа поведение системы автоматического регулирования при различных значениях коэффициентов k_n и k_u .

Для анализа воспользуемся диаграммой Вышнеградского [1].

Характеристическое уравнение для выражения (4) имеет вид:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0, \quad (5)$$

где $a_0 = T_2^2$, $a_1 = T_1$, $a_2 = 1 + k k_{um} k_n$, $a_3 = k k_{um} k_u$.

Параметры Вышнеградского для уравнения (5) равны:

$$A = \frac{a_1}{\sqrt[3]{a_0 a_3}} = \frac{T_1}{\sqrt[3]{(T_2^2)^2 \cdot k \cdot k_{um} \cdot k_u}};$$

$$B = \frac{a_2}{\sqrt[3]{a_0 a_3^2}} = \frac{1 + k \cdot k_{um} \cdot k_n}{\sqrt[3]{T_2^2 \cdot (k \cdot k_{um} \cdot k_u)^2}}. \quad (6)$$

Воспользовавшись диаграммой Вышнеградского, возможно для каждого варианта параметров регулятора (k_n , k_u) определить, будет ли переходной процесс неустойчивым (область 0), колебательным (область I), монотонным (область II) или аperiodическим (область III). Желательно подобрать коэффициенты таким образом, чтобы переходной процесс был аperiodическим или монотонным.

Уравнение границы устойчивости (колебательной) [1]:

$$AB = 1 \text{ при } A > 0 \text{ и } B > 0. \quad (7)$$

В данном случае уравнение границы устойчивости имеет вид:

$$\frac{T_1 \cdot (1 + k \cdot k_{um} \cdot k_n)}{T_2^2 \cdot k \cdot k_{um} \cdot k_u} = 1. \quad (8)$$

Граница между областью I и II описывается уравнением [1]:

$$2A^3 - 9AB + 27 = 0, A < 3. \quad (9)$$

Для системы (4) условие (9) имеет вид:

$$k_u = \frac{T_1 \cdot (1 + k \cdot k_{um} \cdot k_n)}{3 \cdot T_2^2 \cdot k \cdot k_{um}} - \frac{2 \cdot T_1^3}{27 \cdot T_2^4 \cdot k \cdot k_{um}}. \quad (10)$$

Условие $A < 3$ принимает вид:

$$k_u > \frac{T_1^3}{27 \cdot (T_2^2)^2 \cdot k \cdot k_{um}}. \quad (11)$$

Граница области III описывается уравнением [1]:

$$A^2 B^2 - 4(A^3 + B^3) + 18AB - 27 = 0, A > 3. \quad (12)$$

Для системы (4) условие (12) имеет вид:

$$T_1^2 \cdot (1 + k \cdot k_{um} \cdot k_n)^2 - 4 \cdot T_1^3 \cdot k \cdot k_{um} \cdot k_u -$$

$$- 4 \cdot T_2^2 \cdot (1 + k \cdot k_{um} \cdot k_n)^3 +$$

$$+ 18 \cdot T_1 \cdot (1 + k \cdot k_{um} \cdot k_n) \cdot T_2^2 \cdot k \cdot k_{um} \cdot k_u -$$

$$27 \cdot T_2^4 \cdot (k \cdot k_{um} \cdot k_u)^2 = 0. \quad (13)$$

Полученные зависимости (8), (10), (11), (13) позволяют отобразить диаграмму Вышнеградского в систему координат $k_n - k_u$.

На рис. 5 представлена преобразованная к коор-

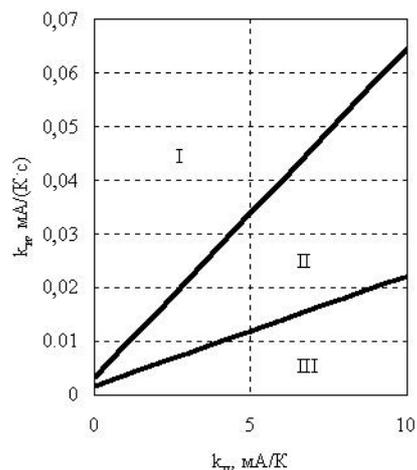


Рис. 5. Характер процесса регулирования нагревателя канала головного блока при различных коэффициентах регулятора: I – зона расходящегося процесса; II – зона периодически сходящегося процесса; III – зона монотонного процесса.

динатам $k_u - k_n$ диаграмма Вышнеградского для системы управления нагревателем канала головного блока. Из рис. 5 видно, что аperiodический процесс в данной системе не реализуется. Характеристики системы сильно ограничивают допустимые значения интегрирующего коэффициента регулятора. Большое значение k_u может привести к незатухающим колебаниям регулируемой температуры. Это вызвано большой тепловой инерцией системы, в первую очередь теплоемкостью десятков метров

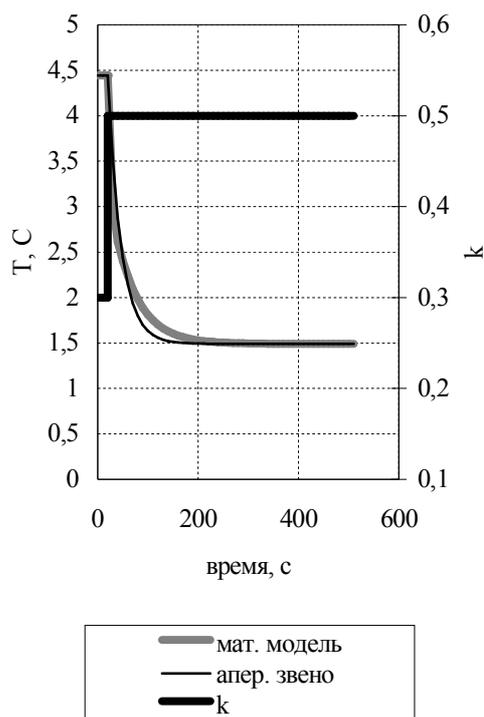


Рис. 6. Переходная характеристика контура теплоносителя: k – положение крана КР: 0 – полностью закрыт, 1 – полностью открыт

трубопроводов, разделяющих нагреватель и датчик температуры.

Определение характеристики регулятора расхода. Для использования ПИД-регулятора необходимо подобрать его коэффициенты таким образом, чтобы обеспечить выполнение технического задания по качеству регулирования температуры. Подбор коэффициентов будет осуществлен аналогично подбору коэффициентов ПИД-регуляторов нагревателей. Используемая математическая модель описывала блок СКВ и контур циркуляции жидкого теплоносителя. В ходе анализа результатов численных экспериментов удалось определить, что характеристики математической модели удовлетворительно описываются характеристиками аperiодического звена I порядка (рис. 6).

На рис. 7 представлена преобразованная к координатам $k_u - k_n$ диаграмма Вышнеградского для системы управления регулятора расхода. Из рис. 7 вид-

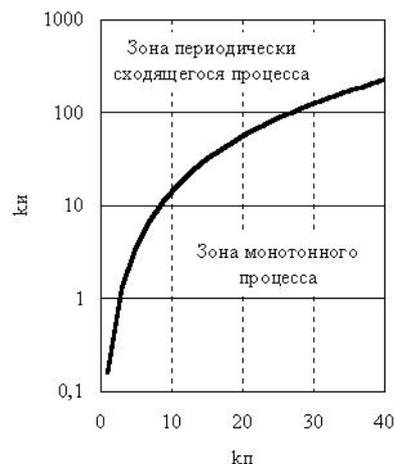


Рис. 7. Характер процесса регулирования контура теплоносителя при различных коэффициентах регулятора

но, что реализуются только периодически сходящийся и монотонный процесс.

Заключение

Примененный подход к определению характеристик САР позволяет применять для объектов, обычно описываемых сложными математическими моделями, классические методики синтеза САР и получать наглядные оценки качества регулирования.

Литература

1. Бесикерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768 с.
2. Prediction of Parameters of the International Space Station Alpha Russian Segment Two-Phase Thermal Control System Under Various Orbit Environmental Conditions / Y. Grigoriev, V. Cykhotsky, Y. Prokhorov, O. Surguchev, G. Gorbenko, V. Blinkov, N. Brus, E. Ganja // Heat transfer – Houston 1996. AICHE Symposium Series. – 1996. – Vol. 92. – P. 25-31.

Поступила в редакцию 9.06.2006

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