

## **МЕТОД ПРОГРАММНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ИНЕРЦИОННЫМ ОБЪЕКТОМ ДЛЯ СИСТЕМЫ С ОДНИМ ДАТЧИКОМ И ОДНИМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ**

---

Разрабатывается математическая модель экстраполятора для системы программного управления, а также метод регулирования системы программного управления для тепловых объектов, которые имеют свойства линейного объекта с самовыравниванием. Метод имеет представление в виде рекуррентной формулы, где учитывается переходный процесс в объекте с помощью массива коэффициентов соответствия. Он разрабатывался для объектов с одним датчиком и одним исполнительным устройством.

### **Введение**

*Постановка задачи.* Процесс управления есть упорядоченная логическая последовательность действий, связанная с переводом объекта управления из одного состояния в другое, призванная компенсировать накопленные на предыдущих этапах негативные тенденции и обеспечить достижение конечных результатов при заданном уровне экономической эффективности. Как и всякий технологический процесс, процесс управления не реализуется мгновенно, а имеет определенную протяженность во времени, зависящую от конкретных условий выполнения регулирования, поэтому возникает необходимость учитывать потери времени. Характерная черта адаптации - это текущее накопление информации о процессе функционирования системы, внешней среды и ее использование для улучшения избранного показателя качества. Процесс накопления информации связан с затратами времени, что в итоге приводит к запаздыванию в получении системой управления информации, необходимой для принятия решений. Это существенно снижает эффективность работы систем управления в реальном масштабе времени. Поэтому актуальной является задача прогнозирования состояний (ситуаций) системы, внешней среды и характеристик (поведения) системы для адаптивного управления. Такой прогноз может быть выполнен при использовании данного метода в системе управления. Для инерционных объектов часто применяют структуру, включающую идеальное звено экстраполяции. Теория управления с предсказанием рассматривает методы экстраполяции (предсказания) состояния объекта и выработки управляющего воздействия с упреждением [1, 2].

Анализ свойств объекта регулирования, требований к системе регулирования и характера входного сигнала системы  $X(t)$  позволяет выделить следующие их особенности, существенно упрощающие синтез системы регулирования:

– объект регулирования должен обладать большой инерционностью, поэтому переход от непрерывной системы к дискретной не вызовет существенного ухудшения характеристик системы;

– объект управления должен относиться к классу объектов с самовыравниванием;

– теплофизические параметры объекта управления в заданном диапазоне температур должны оставаться неизменными;

– входной сигнал  $X(t)$  – детерминированная наперед заданная функция времени;

– уровень помех на входе системы, к которым, очевидно, нужно отнести ошибку задания входной величины  $X(t)$  и возмущающие воздействия (колебания температуры окружающей среды) на систему, небрежно мал;

– функция  $X(t)$  не должна иметь производных по времени, равных бесконечности.

Это позволяет сделать следующие упрощения. Непрерывная величина  $X(t)$ , которая отражает закон изменения температуры в объекте, заменяется последовательностью дискретных значений  $X_1, X_2, \dots, X_m$ . Переходная функция объекта  $h(t)$  заменяется набором дискретных значений  $K_1, K_2, \dots, K_n$ . Период дискретизации функций  $X(t)$  и  $h(t)$  одинаков и равен  $\tau = \text{const}$ . Эти упрощения позволили синтезировать структурную схему системы терморегулирования.

*Цели и задачи:* разработать метод программного регулирования с предсказанием для инерционного объекта управления с одним датчиком и одним исполнительным устройством при условии, что объекту присущи свойства линейности, самовыравнивания и справедлив принцип суперпозиции.

*Анализ литературы.* Истоки идеи индуктивного моделирования кроются в проблеме синтеза оптимального нелинейного предсказывающего фильтра, которую впервые сформулировал А. Н. Колмогоров в 1941г. [1]. Дальнейшее развитие идея получила в теории линейной фильтрации Колмогорова-Винера [1,2]. В начале 60-х годов прошлого века Д. Габор предложил универсальный предсказывающий фильтр с самонастройкой в процессе обучения [3], который реализует алгоритм предсказания будущего значения стационарной функции времени по ее предыстории путем нахождения оптимальных весовых коэффициентов расширенного оператора предсказания. Однако перечисленные работы не содержат моделей фильтров, предназначенных для решения задач управления тепловыми объектами. Некоторые вопросы теории предсказания детерминированных и случайных процессов рассмотрены в работе [5], где особое внимание уделяется реализации различных алгоритмов-операторов предсказания на электронных цифровых вычислительных машинах. Результаты этой работы также не доведены до формы, удобной для управления процессом нагрева/охлаждения инерционных объектов. В работе [6] предложено несколько методов управления температурными полями, однако в них не используется предсказывающий фильтр.

### **Математическая модель метода управления**

Для реализации предлагаемого метода на стадии подготовки необходимо снять переходную характеристику объекта регулирования. По полученной кривой измеряется длительность переходных процессов в объекте (рис. 1). По определению, переходная функция объекта регулирования есть реакция объекта на управляющее воздействие в виде единичной функции [3]. Для линейных объектов справедливо утверждение, что характер переходной функции не зависит от величины (амплитуды) управляющего воздействия, т.е. отношение выходного параметра объекта  $Y(t)$  (приращения температуры) к управляющему воздействию  $X$  вида единичной функции есть величина постоянная для одного и того же момента времени, для всех  $X$ :

$$K = \frac{Y(t)}{X} \Big|_{t=\text{const}} = \text{const} \quad (0 < X < X_{\text{max}}), \quad (1)$$

где  $X_{\text{max}}$  – максимальное значение управляющего воздействия, при котором сохраняются линейные свойства объекта управления. Очевидно, что с течением времени значение

коэффициента  $K$  будет изменяться вплоть до окончания переходного процесса в объекте. Если переходную функцию объекта по оси времени разбить на  $n$  равных интервалов  $\tau$  (рис.1,  $n=6$ ), то в моменты времени  $t$ , кратные  $\tau$ , можно рассчитать коэффициенты  $K_j$  по формуле:

$$K_j = \frac{Y(t)}{X} \Big|_{t=\tau \cdot j} \quad (1 < j < n), \quad (2)$$

которыми однозначно определяется переходная функция объекта в этих точках для любых значений управляющего воздействия:

$$Y(t) = X \cdot K_j \Big|_{t=\tau \cdot j} \quad (0 < X < X_{\max}; 1 < j < n). \quad (3)$$

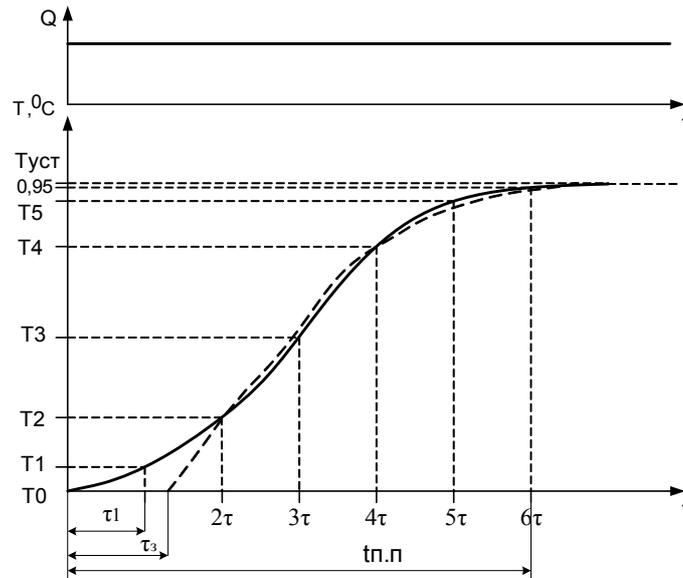


Рис. 1. Переходная функция исследуемого объекта

С другой стороны, с помощью коэффициентов  $K_j$  можно рассчитать значение управляющего воздействия  $X$ , которое за заданное время  $t = i \cdot \tau$  вызовет изменение выходного параметра до  $Y(i)$ :

$$X = \frac{Y(i)}{K_j} \Big|_{i=\tau \cdot j} \quad (1 < j < n). \quad (4)$$

Таким образом, задание переходной характеристики в виде матрицы коэффициентов  $[K]$  позволяет однозначно связать величину управляющего воздействия, заданного в виде единичной функции, с состоянием объекта управления.

В соответствии с принципом суперпозиции выходную величину можно рассматривать как алгебраическую сумму реакций объекта на элементарные управляющие воздействия, алгебраической суммой которых можно представить любое управляющее воздействие. На основании сказанного выше любую ступенчатую функцию, в виде которой сформировано управляющее воздействие, можно представить в виде суммы единичных функций:

$$X_i = x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_i \quad (0 < i < \infty), \quad (5)$$

а реакцию объекта вычислять как сумму реакций на соответствующие единичные функции:

$$Y_i = y_0 + y_1 + y_2 + \dots + y_i \quad (0 < i < \infty). \quad (6)$$

На рис. 2 представлена структурная схема системы, реализующая предлагаемый метод [4]. Данная система содержит блок 1 памяти кодов приращения тепловых потоков; блок 2 памяти кодов коэффициентов  $K_j$ ; вычислитель 3 прогнозируемого изменения температуры к концу интервала регулирования под воздействием тепла, подведенного к началу этого

интервала; программный задатчик 4; элемент сравнения 5 для вычисления кода и знака прогнозируемой ошибки рассогласования; аналого-цифровой преобразователь 6; элемент сравнения 7 для вычисления кода и знака имеющейся ошибки рассогласования; сумматор 8 для вычисления суммарной прогнозируемой ошибки рассогласования; вычислитель 9 для вычисления кодов приращения теплового потока и суммарного теплового потока. Система также содержит функциональный преобразователь 10 для вычисления кода, пропорционального току, который необходимо подать на нагреватель в течение следующего интервала программного регулирования; элемент памяти 11 для хранения кода, пропорционального току в нагревателе; цифро-аналоговые преобразователи 12, усилитель тока 13, нагреватель 14, объект регулирования 15 и датчик температуры 16.

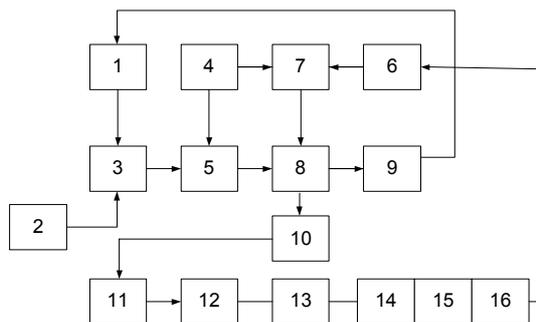


Рис. 2. Структурная схема системы программного регулирования объектом

В исходном состоянии блок памяти 1 и элемент памяти 11 обнулены, в блок памяти 2 занесены коды  $K_j$ . В блок задатчика 4 занесена программа изменения температуры объекта через интервалы времени  $\tau$  в виде кодов приращения температуры относительно начальной температуры  $T_0$ . На первый вход элемента сравнения 5 подается код приращения температуры, соответствующий концу первого интервала  $\tau$  программного регулирования, на первый вход элемента сравнения 7 – нулевой код, т.е. код приращения температуры объекта в начальный момент времени. На второй вход элемента сравнения 7 подается код отклонения температуры объекта от  $T_0$ . После запуска системы программного регулирования вычислитель начинает вычисление прогнозируемого изменения температуры объекта относительно  $T_0$ . Для вычисления величины управляющего воздействия, которое за промежуток времени  $\tau$  выведет объект в точку, заданную по программе, необходимо вычислить, в какую точку выйдет объект под управляющим воздействием, которое имело место до начала текущего интервала времени  $\tau$ . Поэтому прогнозируемое изменение температуры в точке  $t = (i+1) \cdot \tau$  необходимо вычислять без учета теплового потока, который будет подан в момент, когда время превысит  $t \cdot \tau$ . С учетом этого формула примет вид:

$$\Delta T_{i+1}^P = K_n \sum_{j=0}^{i-n+1} \Delta Q_j + \sum_{m=i-n+2}^{i-1} \Delta Q_m \cdot K_{i-m+1}, \quad i=1,2,\dots,\infty, \quad (7)$$

где  $\Delta T_{i+1}^P$  – расчетное прогнозируемое изменение температуры объекта к моменту времени  $t = (i+1) \cdot \tau$  под воздействием суммарного теплового потока, подведенного до момента времени  $t = i \cdot \tau$ ;  $\Delta Q_j$  – приращение управляющего воздействия теплового потока в момент времени  $t = j \cdot \tau$ . Формула представляет собой алгоритм работы вычислителя 3. Графическая интерпретация вычисления прогнозируемого изменения температуры приведена на (рис. 3). Для наглядности иллюстрации число  $n$  ограничено шестью. Управляющее воздействие (график 1) можно разбить на единичные функции (графики 2, 4, 6, 8). На графиках 3, 5, 7, 9 представлены изменения температуры объекта под воздействием соответствующих тепловых потоков. Суммарное изменение температуры объекта представлено на графике 12 и вычисляется как алгебраическая сумма ординат графиков 3, 5, 7, 9 [5].

Рассчитаем прогнозируемое изменение температуры объекта в момент времени  $t = 10\tau$  :

$$\Delta T_{10}^P = (\Delta Q_0 + \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4)K_6 + \Delta Q_5 \cdot K_5 + \Delta Q_6 \cdot K_4 + \Delta Q_7 \cdot K_3 + \Delta Q_8 \cdot K_2. \quad (8)$$

В приведенном на рис. 3 примере  $\Delta Q$  в моменты времени  $3\tau, 5\tau, 7\tau, 8\tau, 9\tau$  равны нулю.

В элементе сравнения 5 код расчетной температуры сравнивается с кодом температуры задатчика 4. Код разности с соответствующим знаком, равный:

$$\Delta_1 = \Delta T_{i+1}^3 - \Delta T_{i+1}^P, \quad (9)$$

где  $\Delta T_{i+1}^3$  – приращение температуры, требуемое по программе, поступает на первый вход сумматора 8.

Во время выполнения программы регулирования температура окружающей среды может изменяться. Так как скорость изменения температуры окружающей среды обычно значительно меньше скорости температуры объекта, переходными процессами, обусловленными колебаниями внешней температуры, можно пренебречь. Однако эти колебания могут вызвать ошибку рассогласования. Ошибки округления при кодировании  $K_j$  и  $\Delta Q_i$ , равные:

$$\delta = \frac{A}{2^n}, \quad (10)$$

где  $A$  – максимальное значение кодируемой величины,  $2^n$  – число разрядов регистров памяти, а также погрешности ЦАП и АЦП могут вызвать ошибку рассогласования, которую необходимо учитывать. С этой целью на элемент сравнения 7 подается код приращения температуры задатчика для момента времени  $t = i \cdot \tau$  и код температуры датчика, который поступает с выхода АЦП 6. Разностный код, равный:

$$\Delta_2 = \Delta T_i^3 - \Delta T_i^g, \quad (11)$$

подается на второй вход сумматора 8. Так как изменение внешней температуры предсказать сложно и поскольку это изменение за время  $\tau$  пренебрежимо мало, можно принять  $\Delta_2(i+1) = \Delta_2(i)$ . Исходя из этого рассчитывается полное отклонение прогнозируемой температуры объекта от температуры задатчика:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \left( \Delta T_{i+1}^3 - \Delta T_{i+1}^P \right) + \left( \Delta T_i^3 - \Delta T_i^g \right). \quad (12)$$

Значение  $\Delta$  вычисляется сумматором 8. Очевидно, что для  $i=1$  при условии, что температура объекта не отличалась от  $T_0$ ,  $\Delta T = \Delta T_{i+1}^3$ , поскольку все остальные слагаемые равны нулю.

Для того чтобы с момента времени  $t = (i+1) \cdot \tau$  вывести объект в заданную точку, начиная с момента времени  $t = i \cdot \tau$  к объекту нужно подвести дополнительно такой тепловой поток, который вызовет равное по величине, но противоположное по знаку изменение температуры.

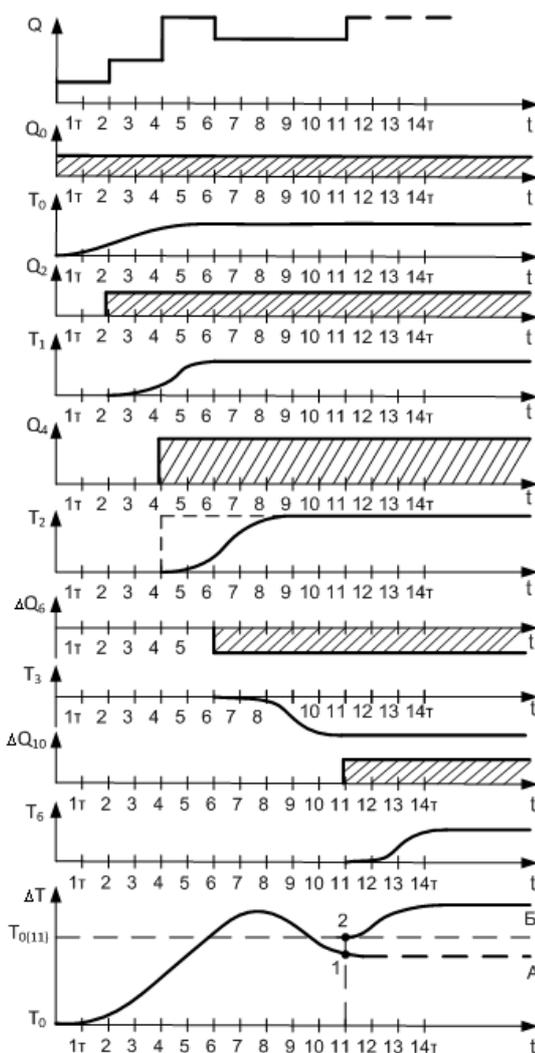


Рис. 3. Графическая интерпретация вычисления прогнозируемого изменения температуры

Значение приращения теплового потока вычисляется по формуле:

$$\Delta Q_i = \frac{\Delta}{K_1}, \quad (13)$$

где  $\Delta Q_i$  – приращение теплового потока в момент времени  $t = i \cdot \tau$ . Поскольку полное отклонение температуры  $\Delta$  необходимо компенсировать за время, равное  $\tau$ ,  $\Delta$  необходимо разделить на  $K_1$ .

Полный тепловой поток, который будет подаваться с момента времени  $t = i \cdot \tau$  до  $t = (i + 1) \cdot \tau$ , равен:

$$Q_i = \sum_{j=1}^i \Delta Q_j. \quad (14)$$

Значение кодов приращения теплового потока  $\Delta Q_i$  и суммарного теплового потока  $Q_i$  вычисляется в вычислителе 9, после чего код приращения пересылается в блок памяти 1, а код суммарного теплового потока поступает на вход функционального преобразователя 10. С выхода функционального преобразователя код, пропорциональный току нагревателя, записывается в элемент памяти 11, а затем преобразуется цифро-аналоговым преобразователем 12 в аналоговый сигнал, который усиливается усилителем мощности 13 и подается на нагреватель 14.

Под воздействием подведенного к объекту тепла объект начинает изменять свою температуру до  $\Delta T_{i+1}^3$ . После записи кода в элемент памяти 11 система начинает вычислять значение управляющего воздействия для интервала времени от  $t = (i + 1) \cdot \tau$  до  $t = (i + 2) \cdot \tau$ .

Исследование реакции объекта на управляющие воздействия ступенчатой формы, расчет коэффициентов  $K$ , экспериментальное подтверждение справедливости полученных выражений произведены с применением тепловой модели в среде Ansys [5, 6].

#### **Выводы**

*Научная новизна.* Приведены формулы, описывающие процесс управления инерционным объектом. Выведены формулы, описывающие программное регулирование с предсказанием инерционным объектом для системы с одним датчиком и одним исполнительным устройством при подаче на нее управляющего воздействия ступенчатой формы.

*Практическая ценность* работы заключается в том, что рассмотренная математическая модель достаточно точно описывает процесс управления с предсказанием. На основе математической модели разработана структурная схема и алгоритм функционирования системы управления с предсказывающим фильтром.

*Перспективы исследований.* Планируется провести исследования и применить данный подход управления с предсказанием поведения объекта для управления системами с распределенными параметрами.

**Список литературы:** 1. Колмогоров А. Н. Проблема синтеза оптимального предсказывающего фильтра. Изв. АН СССР. Сер. матем. и естеств. наук. 1941. №5. С 112-129. 2. Weiner N. The Extrapolation Interpolation and Smoothing of Stationary Time-Series. I. Wiley, N.Y., 1949. 290 p. 3. Gabor D., Wilby W.R., Woodcock R.A. A universal nonlinear filter, predictor and simulator which optimizes itself by a learning process. Proc. Inst. Electr. Engrs. 1961. vol. 108. part B, №40, P. 85-98. 4. Ивахненко А. Г., Лапа В. Г. Предсказание случайных процессов. Киев: Наук. думка, 1971. 415 с. 5. Сироджа И. Б. Квантовые модели и методы искусственного интеллекта для принятия решений и управления. Киев: Наук. думка, 2002. 490 с. 6. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1975. 568 с.

*Поступила в редколлегию 11.06.2011*

**Гапон Анатолий Иванович**, декан факультета АП НТУ «ХПИ», канд. техн. наук., доцент кафедры АУТС НТУ «ХПИ». Научные интересы: теория управления, системы управления объектами с распределенными параметрами. Увлечения: баскетбол, путешествия. Адрес: Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел. (057) 707-62-66. E-mail: garon@kpi.khtrpov.ua

**Савицкий Сергей Михайлович**, аспирант кафедры АУТС НТУ «ХПИ». Научные интересы: теория управления, системы управления объектами с распределенными параметрами, инерционные объекты, математическое моделирование. Увлечение: футбол, плавание, баскетбол, шахматы, русский бильярд, горные лыжи, общественная деятельность. Адрес: Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел.: (057) 707-62-66. E-mail: savitskiy.s@ukr.net