

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ПРИТОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕПЦИИ МЕТОДА ПИРСОНА

В настоящее время в административных изданиях все большее распространение получают системы количественного регулирования температуры приточного воздуха. При таком способе регулирования стабилизация температуры в помещении достигается за счет изменения количества воздуха, проходящего через калорифер. При этом запорно-регулирующий клапан, обеспечивающий подачу теплоносителя в калорифер, остается постоянно открытым, за исключением режима защиты от замораживания, а скорость вентилятора регулируется с помощью преобразователя частоты [1]. При таком способе регулирования увеличивается энергоэффективность системы приточной вентиляции, повышается надежность оборудования в целом.

В то же время существенной особенностью контура регулирования температуры является наличие существенных нелинейностей, а также вариаций постоянной времени технологического процесса [2]. Основной нелинейностью, определяющей качество переходных процессов, является ограничение максимального ускорения вентилятора, определяемое максимальным током для используемого преобразователя частоты. В ряде случаев определяющим становится также и время замедления вентилятора, устанавливаемого в преобразователе частоты таким образом, чтобы двигатель не переходил в режим рекуперативного торможения в процессе работы и при аварийных ситуациях. Также на качество переходных процессов существенно влияет то, что постоянная времени нагрева технологического процесса в подавляющем большинстве случаев не равна постоянной времени охлаждения.

Ввиду вышеуказанных факторов процедура настройки стандартных ПИД – регуляторов, используемых в таких системах, является крайне сложной и часто дает результат, весьма далекий от оптимального. Даже при использовании процедуры автоматического определения ПИД – составляющих, реализованной в большинстве современных микропроцессорных регуляторов, возникает необходимость коррекции полученных результатов персоналом в процессе пусконаладочных работ.

В ряде случаев целесообразным является использование нечетких алгоритмов управления, однако это приводит к необходимости привлечения высококвалифицированного персонала для формулировки правил нечеткой логики. Однако, и в этом случае, алгоритм управления не является оптимальным, а обеспечивает лишь удовлетворительное качество переходных процессов. Таким образом, задача нахождения алгоритма управления системой приточной вентиляции, обеспечивающего оптимальный характер переходных процессов при наличии нелинейностей и вариаций параметров технологического процесса, является актуальной.

Структурная схема системы количественного регулирования температуры приточного воздуха представлена на рис.1.

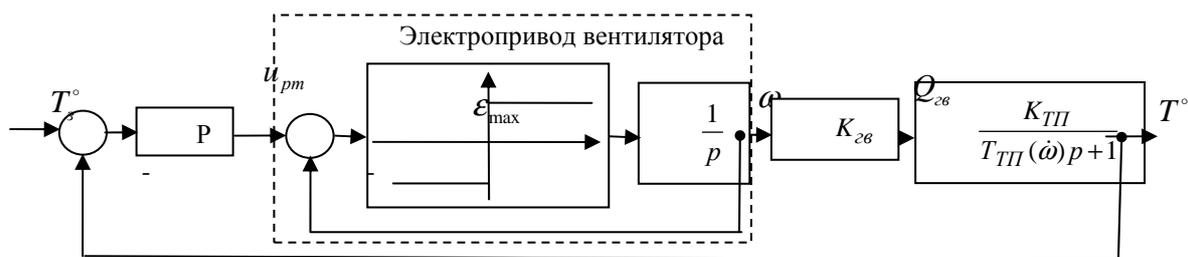


Рис.1. Структурная схема системы регулирования температуры приточного воздуха

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $T_3^\circ$  – заданная температура приточного воздуха;  $T^\circ$  – текущая температура приточного воздуха; РТ – регулятор температуры;  $\omega$  – скорость вращения вентилятора;  $Q_{ze}$  – количество горячего воздуха;  $K_{ТП}$ ,  $T_{ТП}(\omega)$  – коэффициент усиления и постоянная времени технологического процесса;  $\epsilon_{max}$  – максимальное допустимое ускорение вентилятора;  $K_{ze}$  – коэффициент усиления процесса нагрева воздуха.

Одним из наиболее популярных подходов к решению задачи синтеза оптимального регулятора является метод Беллмана – Ляпунова. В то же время для полученной математической модели контура стабилизации температуры приточного воздуха задачу обратной динамики решать крайне затруднительно, так как в системе имеются существенные нелинейности в виде ограничения ускорения вентилятора, а также зависимости постоянной времени технологического процесса от углового ускорения. Поэтому целесообразно для решения этой задачи использовать метод Беллмана – Ляпунова с применением концепции метода Пирсона [3].

При этом осуществляется замена однозначной нелинейности, имеющейся в контуре, прямой с переменным коэффициентом усиления, являющегося функцией переменных состояния. Помимо этого, фиксируется знак углового ускорения вентилятора и, в соответствии с ним, пересчитывается постоянная времени технологического процесса. Далее решается задача аналитического конструирования для линеаризованной системы и квадратичного функционала качества на каждом шаге вычисления управляющего воздействия.

Для решения задачи синтеза оптимального регулятора методом Беллмана – Ляпунова запишем математическую модель управляемого объекта в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -a_1(\dot{x}_2) \cdot x_1 + a_2(\dot{x}_2) \cdot x_2; \\ \dot{x}_2 &= b \cdot \text{sign}(u - x_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_1 = T_{np}$ ;  $x_2 = \omega$ ;  $u = u_{pm}$ ;  $a_1(\dot{x}_2) = T_{III}(\omega)^{-1}$ ;  $a_2(x_2) = K_{III} \cdot T_{III}(\dot{\omega})^{-1} \cdot K_{\omega}$ ;  $b = \varepsilon_{\max}$ .

Осуществим линеаризацию нелинейности, а также замену варьируемых параметров. При этом система уравнений (1) переписывается в виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -a'_1 \cdot x_1 + a'_2 \cdot x_2; \\ \dot{x}_2 &= -b \cdot K_1 \cdot x_2 + b \cdot K_1 \cdot u. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $a'_1, a'_2$  - коэффициенты матрицы динамики, значения которых определяются угловым ускорением вращения вентилятора;  $K_1$  - коэффициент «мгновенной» линеаризации нелинейности типа «двухпозиционное реле».

В качестве минимизируемого функционала качества выбираем критерий обобщенной работы Красовского А.А. [4], отвечающий требованиям динамической точности и минимума энергетических затрат на управление:

$$\min_u J = \int_0^{\infty} (\alpha_1 \cdot x_1^2 + \alpha_2 \cdot x_2^2 + c \cdot u^2 + u_{onn}^2) dt. \quad (3)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, c$  - весовые коэффициенты, определяющие ограничение на переменных состояния и управляющее воздействие;  $u_{onn}$  - оптимальное управляющее воздействие.

Следует отметить, что составляющая  $u_{onn}^2$  не оказывает существенного влияния на качество регулирования, однако позволяет существенно упростить процедуру синтеза оптимального регулятора и перейти от системы квадратичных уравнений Риккати к системе линейных алгебраических уравнений [5].

Для линеаризованной системы дифференциальных уравнений (2) и квадратичного функционала (3) запишем функциональное уравнение Беллмана:

$$\min_u [\alpha_1 \cdot x_1^2 + \alpha_2 \cdot x_2^2 + c \cdot u^2 + u_{onn}^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} \cdot (-a'_1 \cdot x_1 + a'_2 \cdot x_2) + \frac{\partial V}{\partial x_2} \cdot (-b \cdot K_1 \cdot x_2 + b \cdot K_1 \cdot u)] = 0. \quad (4)$$

где  $V$  - функция Беллмана.

Реализуем процедуру поиска минимума функционала и запишем уравнение оптимального регулятора в явном виде:

$$u = -\frac{b \cdot K_1}{2 \cdot c} \cdot \frac{\partial V}{\partial x_2}. \quad (5)$$

Далее получим уравнение Гамильтона – Якоби – Беллмана в замкнутой форме:

$$\alpha_1 \cdot x_1^2 + \alpha_2 \cdot x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} \cdot (-a'_1 \cdot x_1 + a'_2 \cdot x_2) - \frac{\partial V}{\partial x_2} \cdot b \cdot K_1 \cdot x_2 = 0. \quad (6)$$

Полагаем, что решение полученного уравнения удовлетворяется квадратичной формой  $V = K_{11} \cdot x_1^2 + 2 \cdot K_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + K_{22} \cdot x_2^2$ , при этом коэффициенты квадратичной формы определяются из системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \alpha_1 - 2 \cdot a'_1 \cdot K_{11} &= 0; \\ 2 \cdot K_{11} \cdot a'_2 - 2 \cdot K_{12} \cdot a'_1 - 2 \cdot K_{12} \cdot b \cdot K_1 &= 0; \\ \alpha_2 + 2 \cdot a'_2 \cdot K_{12} - 2 \cdot K_{22} \cdot b \cdot K_1 &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициенты функции Беллмана в явном виде запишутся:

$$\begin{aligned} K_{11} &= 0,5 \alpha_1 a_1'^{-1}; \\ K_{12} &= K_{11} \cdot a_2' (a_1' + b \cdot K_1)^{-1}; \\ K_{22} &= 0,5 (b \cdot K_1)^{-1} (\alpha_2 + 2 \cdot a_2' \cdot K_{12}). \end{aligned} \quad (8)$$

Закон оптимального управления на выходе регулятора температуры принимает вид:

$$u = -\frac{b \cdot K_1}{c} \cdot \left( \frac{a_1}{2 \cdot a_1} \cdot \frac{a_2}{a_1 + b \cdot K_1} \cdot x_1 + \frac{a_2 + 2 \cdot a_2 \cdot \frac{a_1}{2 \cdot a_1} \cdot \frac{a_2}{a_1 + b \cdot K_1}}{2 \cdot b \cdot K_1} \cdot x_2 \right). \quad (9)$$

В представленной модели не учитывается ограничение на выходе регулятора температуры, инерционность асинхронного двигателя вентилятора, а также нелинейность коэффициента усиления процесса нагрева воздуха. Исследование системы с учетом этих факторов было проведено с использованием физической модели с электрическим нагревателем. В качестве микропроцессорного регулятора температуры использовался программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК154-220.А.М. Алгоритм вычисления закона оптимального управления, а также блок плавного изменения выходного сигнала контроллера, пропорциональный изменению скорости двигателя вентилятора, был реализован программно на языке ST. В качестве датчика температуры использовался термометр сопротивления с номинальной характеристикой ТСМ50. При этом во вкладке визуализации проекта в среде разработки Codesys были получены тренды переходных процессов по температуре при использовании стандартного и синтезированного регуляторов. На рис.2 представлены графики переходных процессов при использовании стандартного ПИД -регулятора после проведения автоматической настройки и синтезированного оптимального регулятора.

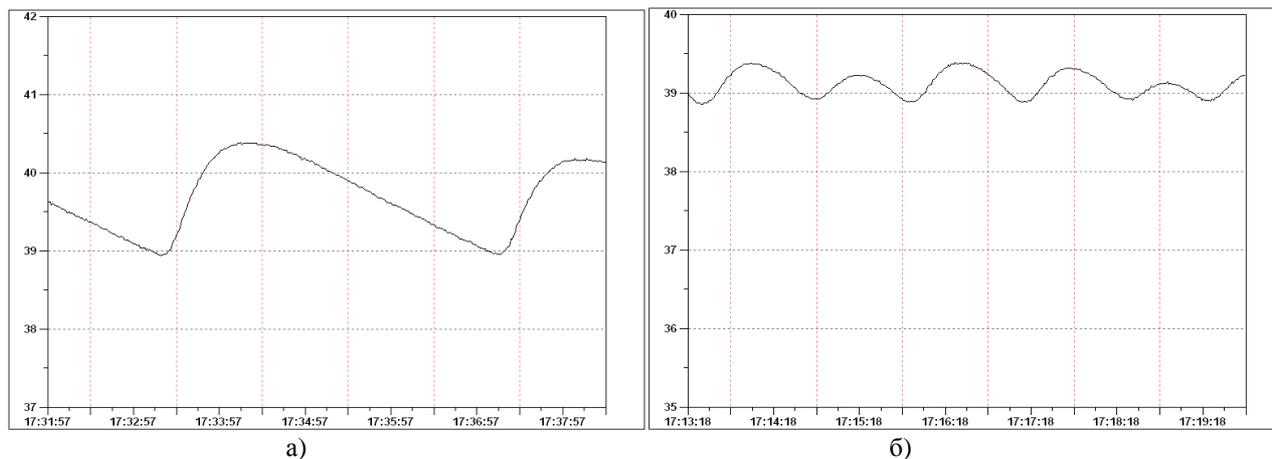


Рис. 2. Графики переходных процессов при использовании синтезированного оптимального регулятора (а) и классического ПИД – регулятора с применением процедуры автоматической настройки (б).

**Выводы.** Использование метода Беллмана – Ляпунова с использованием концепции метода Пирсона позволяет реализовать простое управление электромеханической системой приточной вентиляции, обеспечивающее отсутствие перерегулирования по температуре в переходных режимах. При этом использование современных микропроцессорных систем обеспечивает пересчет алгоритма управления для обеспечения оптимального режима работы. Дальнейшее развитие предложенного подхода к синтезу алгоритмов управления температурой возможно за счет учета динамической составляющей электропривода вентилятора и ограничения на выходе микропроцессорного регулятора.

#### Литература:

1. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Бондарь Е.С., Гордиенко А.С., Михайлов В.А., Нимич Г.В. - К.: "Аванпост-Прим", 2005. - 561с.
2. Кудин В.Ф. Квазиоптимальне керування системою приточної вентиляції з використанням сучасних комп'ютерних технологій/В.Ф. Кудін, А.В. Торопов// Вісник університету «Україна»,№8,Київ, 2010.– с.174-178.
3. Pearson J. D. Approximation Methods in optimal control. Suboptimal control. // J. Electronics and control. . Vol. 13. № 20, 1962. - P. 453.467.
4. Справочник по теории автоматического управления. Под редакцией А. А. Красовского. — М: "Наука". Гл. ред. физ.-мат. Лит. 1987.— 712 с.
5. Летов А.М. Динамика полета и управление/А. М. Летов. - М.: Наука, 1969. – 359с.