УДК 681.536:697.97

Нгуен Ван Выонг, А.А. Шилин, В.Г. Букреев, Ф.В. Перевощиков, А.А. Брянцев

Определение параметров ПИ-регулятора системы управления сложным технологическим объектом в режиме реального времени

Рассматривается методика вычисления в режиме реального времени параметров ПИ-регуляторов системы управления сложным объектом – сушильной установкой пиломатериалов. Алгоритм коррекции параметров регуляторов в проблемных режимах работы сушильной установки основан на интерполяции многочленом Лагранжа известных статистических данных. Показано, что разработанная на программируемом логическом контроллере (ПЛК) система управления обеспечивает регулирование температуры и влажности в объеме установки и ее стабильную работу при изменении режимов сушки материалов.

Ключевые слова: сушильная установка, линеаризованная модель, перенастраиваемый ПИ-регулятор, интерполяция Лагранжа.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-2-56-63

В настоящее время для промышленной сушки материалов широко используется конденсационный метод осушения [1, 2]. Наиболее эффективный вариант реализации такого метода предполагает использование холодной панели, поддерживающей температуру воздуха в сушильной установке на уровне температуры точки росы для конденсации и утилизации жидкости из высушиваемого материала. Помимо этого, используется нагреватель, который устанавливает оптимальную рабочую температуру процесса осушения [3]. Структурная схема объекта управления, использующего такой способ сушки материалов, представлена на рис. 1.

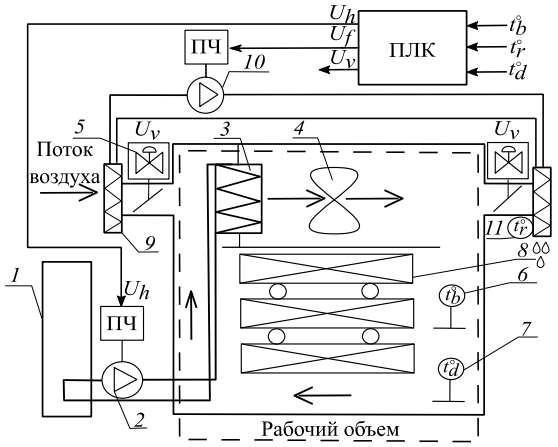

Рис. 1. Структурная схема сушильной установки

На рис. 1 представлены следующие элементы: источником тепла для сушки материалов является газовый котёл *1*, при этом тепловой режим в рабочем объеме установки регулируется частотным электроприводом циркуляционного насоса *2*. Насос обеспечивает перемещение теплоносителя между котлом *1* и воздушным калорифером *3*, который обдувается потоком воздуха с помощью вентилятора *4*. Управление влажностью в установке обеспечивается управляемыми воздушными клапанами *5*. Оценка влажности в рабочем объеме производится по психометрической разности температур, получаемой с «мокрого» датчика *6* температуры и «сухого» датчика *7*. Подвергающийся процессу осушения пиломатериал *8* уложен соответствующим образом для хорошего проветривания. Жидкость выделяется на конденсационной панели *9* из циркулируемого воздуха в рабочем объеме установки. Тепловой режим этой панели регулируется за счет работы соответствующего циркуляционного насоса *10*. В конечном итоге она приобретает температуру, близкую к температуре точки росы, которая измеряется датчиком температуры *11*.

Для регулирования процесса осушения материала используется четырехконтурная система управления нагревом и скоростью потока воздуха [4, 5]. При этом следует учитывать, что физические процессы исследуемого объекта весьма сложны для аналитического описания, так как такой подход требует применения совокупности методов теории тепломассообмена, термодинамики и уравнений в частных производных [6–9]. Этот факт значительно усложняет процесс составления математической модели и реализации законов управления на микроконтроллере.

Поэтому актуальными задачами являются построение математической модели, опирающейся на статистические данные работы сушильной установки, и организация перенастраиваемого регулятора в режиме реального времени. Такой подход может быть универсальным для различных конфигураций сушильных аппаратов, в том числе и без аккумулирования жидкости на холодной панели, а также многоконтурных систем управления в целом.

Построение математической модели системы управления сушильной установкой

Получение математической модели без детального описания физических процессов, происходящих в ней, возможно методами вычислительной математики. Таковыми являются способы интерполяции и аппроксимации экспериментальных данных. Стоит отметить то, что второй метод является вычислительно затратным и слабо реализуемым на МК из-за большого количества вычислений, которые образуются при использовании рекуррентных соотношений.

В качестве рационального решения предлагается рассмотреть задачу интерполяции многочленом Лагранжа [10, 11]. Для двухканального управления многочлен имеет следующий вид:

$$L(U_f,U_h)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} z_{nm}l_{nm}(U_f,U_h), \qquad (1)$$

где N, M – количество узлов интерполяции; z_{nm} – значения температур в рабочем объеме или на конденсационной панели, соответствующие узлу (n,m); $l_{nm}(U_f,U_h)$ – базисные функции; U_f, U_h – воздействия, управляющие вентилятором и нагревателем сушильной установки. Их значения нормированы относительно номинальных параметров объекта управления.

Базисные полиномы определяются следующим выражением:

$$l_{nm}(U_f,U_h)=\prod_{\substack{i=1\\ i\neq n}}^{N}\prod_{\substack{j=1\\ j\neq m}}^{M}\frac{(U_f-U_{fi})(U_h-U_{hj})}{(U_{fn}-U_{fj})(U_{hm}-U_{hj})}, \qquad (2)$$

где U_{fi}, U_{hj} – значения управления вентилятором и нагревателем в статическом режиме, соответствующие узлу (i,j).

Если сетка, состоящая из значений задания, заранее известна, то базисные полиномы могут быть предварительно вычислены и записаны в оперативной памяти МК. Тогда интерполяция сводится к получению экспериментальных значений z_{nm} непосредственно на объекте с целью конечного формирования поверхности распределения температур $L(U_f,U_h)$.

В том случае, если область рабочих значений неизвестна, то необходима удобная форма записи для МК, которая позволила бы произвести интерполяцию в любой точке U_f, U_h. Этого можно достичь, используя векторные величины. Тогда базисные полиномы можно представить как произведение некоторых векторов (3):

$$l_{nm}(U_f,U_h)=\mathbf{L}_{nm}\mathbf{P}^T, \qquad (3)$$

где $\mathbf{P}$ – вектор базисных функций; $\mathbf{L}_{nm}$ – вектор весовых коэффициентов.

Для случая $(N,M)=(3,3)$ вектор базисных функций принимает вид строки

$$\mathbf{P}=\left[U_f^2U_h^2, U_f^2U_h, U_f^2, U_fU_h^2, U_fU_h, U_f, U_h^2, U_h, 1\right].$$

В свою очередь, вектор-строка коэффициентов $\mathbf{L}_{nm}=[c_k]$, $k=\overline{1,9}$ определяется набором значений переменных U_{fi} и U_{hj}, $i,j=\overline{1,3}$.

Для реализации многочленов Лагранжа в визуальной среде моделирования XCos Scilab была создана функция «Out», осуществляющая описанный алгоритм получения поверхности температур в рабочем объеме сушильной установки и температуры конденсационной панели $t_b^\circ(U_h,U_f)$ и $t_r^\circ(U_h,U_f)$ (рис. 2).

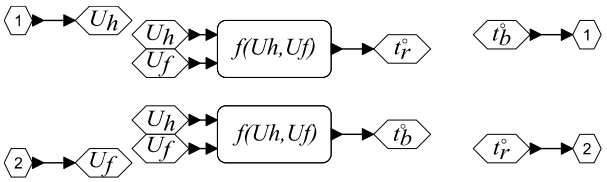

Рис. 2. Реализация функций Лагранжа в Scilab

Синтез системы управления

На основе интерполированной математической модели была построена четырехконтурная САУ, реализованная на функциональных блоках в среде Scilab (рис. 3). Принцип ее работы заключается в том, чтобы по измеренным температурам t_b° и t_r° сформировать соответствующие рассогласования e_{tb} и e_{tr}. В свою очередь, каждая из ошибок умножается на индивидуальный коэффициент передачи $K_{bh}, K_{rh}, K_{bf}, K_{rf}$ (обобщенно K_r), который не содержится в самом блоке регулятора. Далее результат перемножения поступает в ПИ-регулятор «PI» для формирования управляющего значения, которое направляется в динамический блок «Dob». А с выхода динамического блока сигнал передается на сформированный ранее блок статистики, реализующий функции Лагранжа.

Следует отметить то, что объект управления является нелинейным. По этой причине использование аппарата линейной теории возможно только в окрестности точек равновесного состояния U_{h0} и U_{f0}. Поэтому в блоке динамики, который представлен передаточной функцией, необходимо учесть смещение начального состояния в нулевое значение.

Вид передаточной функции блока «Dob» получен из переходных процессов, снятых с экспериментальной установки под управлением среды CoDeSys с помощью ModBus протокола [12–15]. По этим данным можно заключить, что форма переходных процессов имеет вид кривой разгона передаточной функции апериодического звена второго порядка:

$$W_{ob}=\frac{1}{(1+T_1\cdot s)(1+T_2\cdot s)}, \qquad (4)$$

где T_1, T_2 – постоянные времени объекта.

Для получения высокой сходимости модели объекта управления и реального объекта необходимо минимизировать среднеквадратичное отклонение между кривыми выходных величин. Этого можно достичь путем подбора значений постоянных времени передаточной функции (4). Поэтому объект управления был собран на экспериментальной установке, где среда CoDeSys выступает в роли средства сопряжения ПК с контроллером.

Эксперименты базировались на известной методике [16]. В конечном итоге было получено множество кривых переходных процессов $t_b^\circ(t)$ и $t_r^\circ(t)$ при

различных режимах работы. На рис. 4, 5 представлены результаты исследований при уменьшении энергии, потребляемой нагревателем.

Для количественной оценки сходимости модели температурных процессов вида (4) и экспериментальных данных в таблице приведены значения среднеквадратичных рассогласований.

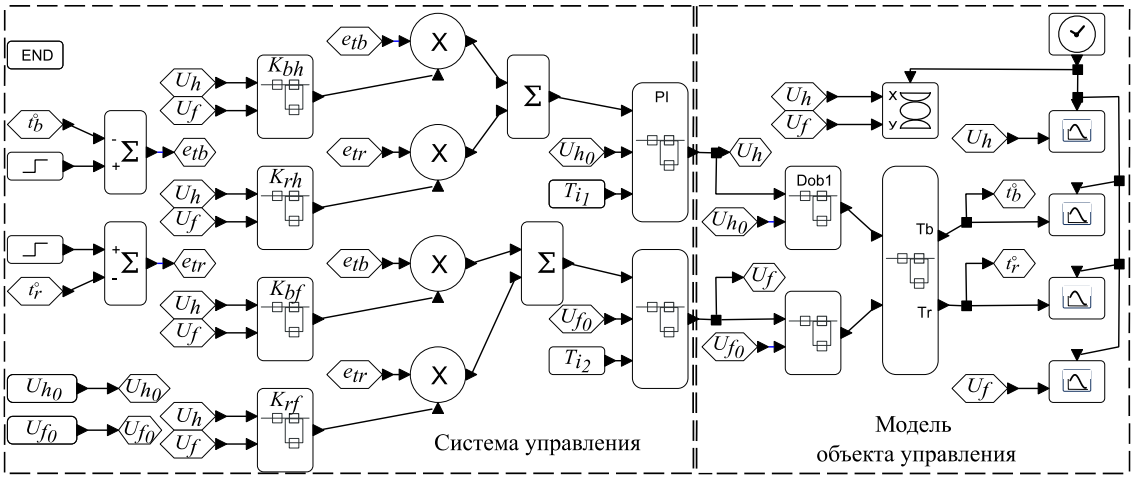

Рис. 3. Структурная схема модели системы управления и объекта в программной среде Scilab

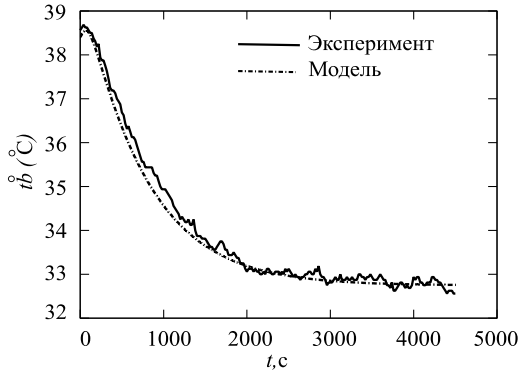

Рис. 4. Переходный процесс температуры в рабочем объеме при уменьшении энергии, потребляемой нагревателем

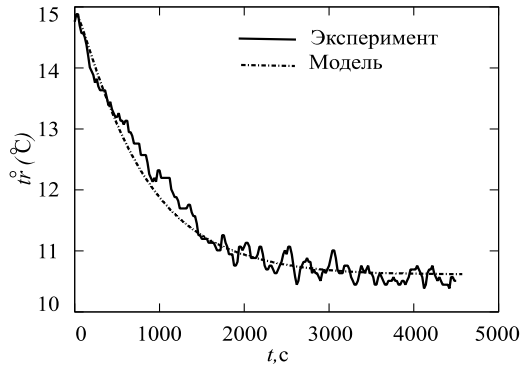

Рис. 5. Переходный процесс температуры конденсационной панели при уменьшении энергии, потребляемой нагревателем

Значения рассогласований модели и эксперимента

Условия эксперимента	Рассогласование для температуры радиатора (%)	Рассогласование для температуры бокса (%)
$U_f = \text{const}, U_h = \text{var}$	2,33	1,69
$U_h = \text{const}, U_f = \text{var}$	1,55	2,26

Из таблицы видно, что расхождение кривых находится в том же порядке, что и ошибки в канале измерений температуры, следовательно, адекватность модели достаточно высокая в статических и динамических режимах. В результате экспериментальных исследований были получены постоянные времени $T_1 = 60$ с, $T_2 = 850$ с для процесса изменения температуры (см. рис. 4) в рабочем объеме установки и $T_1 = 10$ с, $T_2 = 700$ с для процесса изменения температуры (см. рис. 5) на конденсационной панели.

Определение параметров регуляторов

Так как при управлении таким объектом существует некая неопределенность в направлении регулирования вентилятором и нагревателем, то необходимо определить коэффициенты передачи по каждому каналу управления. Это возможно оценить по скорости роста полученных ранее поверхностей $t_b^\circ(U_h, U_f)$ и $t_r^\circ(U_h, U_f)$ при изменении U_f и U_h. Для этого необходимо продифференцировать базисные полиномы по соответствующим направлениям. В матрично-векторной форме такая операция принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial l_{mn}(U_f, U_h)}{\partial U_f} = \partial \mathbf{L}_{U_f} \cdot \mathbf{P}^T, \\ \dfrac{\partial l_{mn}(U_f, U_h)}{\partial U_h} = \partial \mathbf{L}_{U_h} \cdot \mathbf{P}^T, \end{cases} \quad (5)$$

где $\partial \mathbf{L}_{U_f} = [0, 2c_1, 0, 2c_3, 0, c_2, 2c_5, c_4, c_7]$ – вектор коэффициентов производной базисной функции по U_f; $\partial \mathbf{L}_{U_h} = [0, 0, 2c_1, 2c_2, c_3, 0, c_4, 2c_6, c_8]$ – вектор коэффициентов производной базисной функции по U_h.

В итоге формируется четыре поверхности коэффициентов передач по соответствующим каналам:

$$\begin{cases} k_{bh}(U_h,U_f)=\partial_{U_h} t_b^{\circ}(U_h,U_f), \\ k_{rh}(U_h,U_f)=\partial_{U_h} t_r^{\circ}(U_h,U_f), \\ k_{bf}(U_h,U_f)=\partial_{U_f} t_b^{\circ}(U_h,U_f), \\ k_{rf}(U_h,U_f)=\partial_{U_f} t_r^{\circ}(U_h,U_f). \end{cases} \quad (6)$$

Большинство из них имеет положительный знак на всей области значений и ее изменение максимум в 2 раза. Особый интерес представляет поверхность $k_{bf}(U_h,U_f)$, которая на большей своей части находится в отрицательной области, а также переходит ноль и изменяет знак на положительный (рис. 6, *а*). Смена знака отчетливо видна на проекции поверхности $k_{bf}(U_h,U_f)$ (рис. 6, *б*).

Полученные поверхности (6) позволяют перейти к процедуре настройки регуляторов, входящих в систему управления (см. рис. 3).

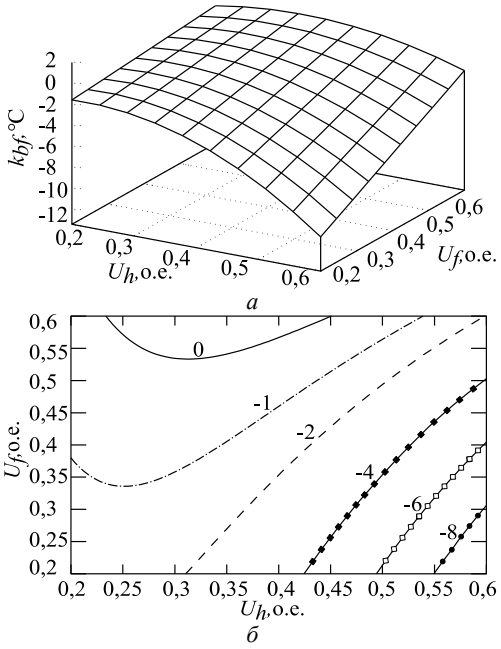

Рис. 6. Поверхность коэффициента передачи $k_{bf}(U_h,U_f)$ – *а*; изолинии поверхности – *б*

Положим, что замкнутый контур оптимально настроен путем приведения его к передаточной функции [17]:

$$W_к(s)=\frac{1}{g\cdot T_μ\cdot s\cdot(1+T_μ\cdot s)}, \quad (7)$$

где $T_μ$ – наименьшая некомпенсируемая постоянная времени контура; g – коэффициент, определяющий колебательность переходного процесса $g\in(0,5;\ 3)$.

С другой стороны, передаточная функция каждого контура, записанная поэлементно, имеет вид

$$W_к(s)=K_r\cdot\left(1+\frac{1}{T_i\cdot s}\right)\cdot k_{ob}\cdot W_{ob}. \quad (8)$$

После сопоставления передаточной функции (7) и (8) получим следующие условия для коэффициентов регулятора:

$$T_i=T_1,\ K_r=\frac{T_1}{g\cdot T_2\cdot k_{ob}}, \quad (9)$$

где k_{ob} – коэффициент передачи объекта. В силу нелинейности системы k_{ob} может менять свое значения в различных точках равновесного состояния, что показано на рис. 6. Для сохранения устойчивости во всем рассматриваемом диапазоне будем использовать их максимальное по модулю значение.

Такой подход хорошо работает для контуров, чей коэффициент передачи k_{ob} не меняет знак. Однако если при настройке контура с коэффициентом передачи k_{bf} принять в качестве максимального значения $k_{bfm}=-4,5$, то наблюдается интересный эффект – переходный процесс из устойчивой точки ($U_f=0,2$; $U_h=0,6$) в точку ($U_f=0,6$; $U_h=0,2$) сопровождается тем, что переменные состояния при такой настройке системы не достигают целевых значений. Это определяется тем, что в какой-то момент времени переходного процесса проявляется положительная обратная связь, образующаяся из-за смены знака коэффициента передачи на положительный. Вследствие этого задающее напряжение вентилятора устанавливается в максимально возможное значение и фазовая траектория приобретает неустойчивый характер (рис. 7).

Как правило, в таком состоянии системы обслуживающий персонал переводит систему управления в ручной режим, зафиксировав ее неадекватную работу. Для достижения целевых значений требуется обеспечить уменьшение значения напряжения, подаваемого на обмотки двигателя вентилятора. Однако, эту проблему можно решить, если значение коэффициента передачи принимается равным $k_{bfm}=-6$. При такой настройке регуляторов система сохранила устойчивость (рис. 8).

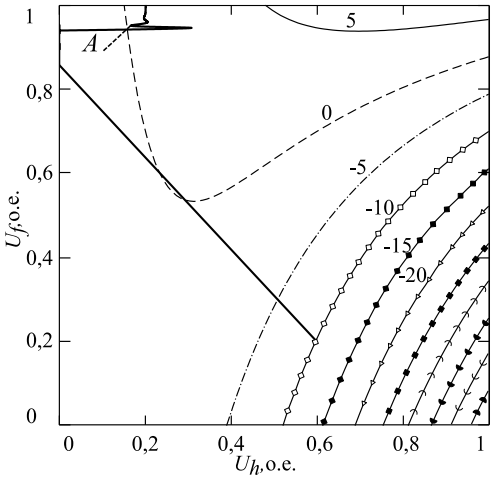

Рис. 7. Фазовый портрет управляющих воздействий при $k_{bfm}=-4,5$ на фоне изолиний $k_{bf}(U_h,U_f)$

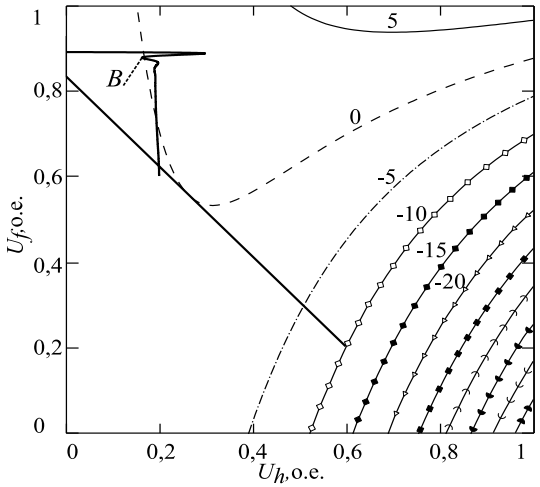

Рис. 8. Фазовый портрет управляющих воздействий при $k_{bf} = -6$ на фоне изолиний $k_{bf}(U_h, U_f)$

Критический момент соответствует точкам *A* и *B*. Точка *A* находится в контуре, образованном изолинией нулевого коэффициента передачи. В этом случае в системе возникает положительная обратная связь, что приведет к потере устойчивости. Точка *B* располагается в контуре, где сохраняется отрицательная обратная связь, соответственно обеспечивается устойчивость системы в целом.

Для общего решения этой проблемы предлагается следующее. С помощью коррекции коэффициента передачи возможно парировать влияние контура управления вентилятором на температуру в рабочем объеме. Суть работы корректирующего множителя заключается в придании нулевого значения соответствующему коэффициенту передачи регулятора в некоторой окрестности нуля k_{bf}. Если же значения k_{bf} выходят за рамки обозначенной нулевой области, то множитель равняется единице и не оказывает никакого влияния. Математическая запись изложенного алгоритма имеет следующий вид:

$$m_{bf}(k_{bf}) = \begin{cases} m_0, \text{если} \left(\dfrac{k_{fb}}{k_{fbm}} < n_0 \right), \\ m_0 + \left(\dfrac{m_1 - m_0}{n_1 - n_0} \right) \left(\dfrac{k_{fb}}{k_{fbm}} - n_0 \right), \text{если} \left(n_0 \le \dfrac{k_{bf}}{k_{bfm}} < n_1 \right), \\ m_1 + \left(\dfrac{m_2 - m_1}{n_2 - n_1} \right) \left(\dfrac{k_{fb}}{k_{fbm}} - n_1 \right), \text{если} \left(n_1 \le \dfrac{k_{bf}}{k_{bfm}} < n_2 \right), \\ m_2 + \left(\dfrac{m_3 - m_2}{n_3 - n_2} \right) \left(\dfrac{k_{fb}}{k_{fbm}} - n_2 \right), \text{если} \left(n_2 \le \dfrac{k_{bf}}{k_{bfm}} < n_3 \right), \\ m_3, \text{если} \left(n_3 \le \dfrac{k_{fb}}{k_{fbm}} \right), \end{cases} \quad (10)$$

где $n_i = (0{,}1; 0{,}25; 0{,}75; 1)$ и $m_i = (0; 0{,}2; 0{,}8; 1)$ – параметры, которые позволяют добиться плавности при изменении значений коэффициента регулятора. Их использование исключает резкие изменения сигнала управления вентилятором. Наиболее наглядно выполнение условий (10) видно на проекции поверхности $k_{bf}(P_h, P_f)$ (рис. 9).

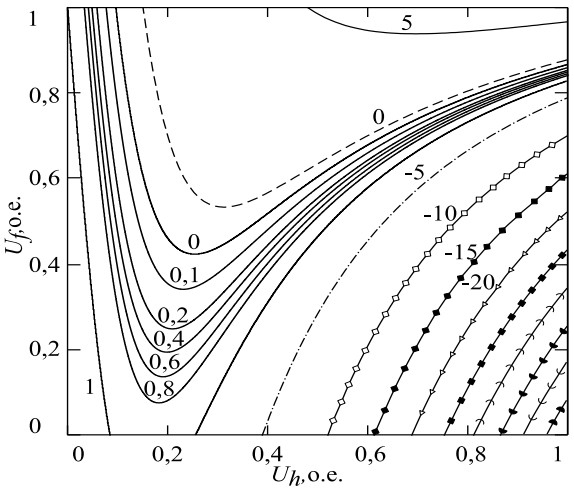

Рис. 9. Проекция множителя $m_{bf}(k_{bf})$ на фоне изолиний $k_{bf}(U_h, U_f)$

Как видно из рис. 9, в зоне нечувствительности ($k_{bf} \approx 0 \pm \varepsilon$) во избежание пагубного влияния положительной обратной связи $m_{bf}(k_{bf})$ имеет нулевое значение, что полностью исключает регулирование в этом контуре. При приближении к областям с большими по модулю коэффициентами передачи – множитель плавно растет, вплоть до единицы.

Рассмотрим результаты моделирования с интегрированным алгоритмом коррекции в систему управления сушильной установкой. Полученный фазовый портрет управляющих воздействий представлен на рис. 10.

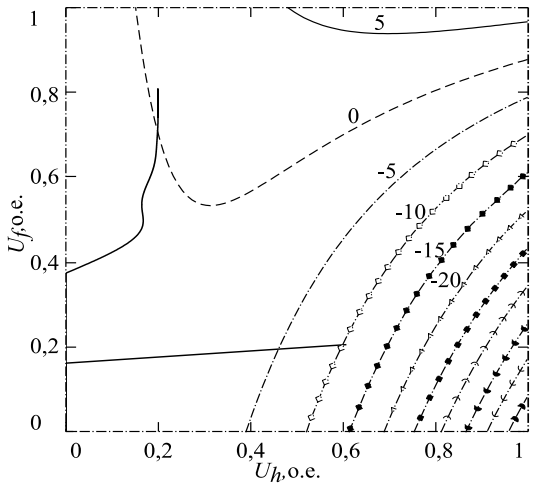

Рис. 10. Фазовый портрет управляющих воздействий при использовании разработанной системы управления на фоне изолиний $k_{bf}(U_h, U_f)$

Как видно из кривых, представленных на рис. 10, устойчивость сохраняется при использовании разра-

ботанного алгоритма коррекции. Однако стоит отметить важный факт: нормальная работа аппарата обеспечивается только в области заранее определенной сетки значений задания, по которой строился исходный многочлен Лагранжа. Вне этой области нельзя гарантировать управляемость системы из-за существенной нелинейности полученных коэффициентов.

Реализация алгоритма управления на ПЛК

Для реализации системы разработан ПЛК на базе микропроцессора STM32f103C8Tx. В качестве операционной среды контроллера применяется RTos.

Экспериментальные данные удалось получить с производственной установки для сушки пиломатериалов объемом 80 м^3, которая не имеет конденсационную панель. Поэтому второй канал управления регулирует положение воздушного клапана.

По результатам замеров можно заключить, что поверхности коэффициентов передачи не имеют границ изменений знака. Такое поведение полученных характеристик говорит о том, что корректирующий множитель будет иметь постоянное значение, модуль которого равняется единице. Вследствие этого непредсказуемость в управлении отсутствует. Однако существует небольшое исключение – поверхность коэффициента передачи температуры в боксе $k_{bh}(U_v,U_h)$ по управлению нагревателем. Ее проекция представлена на рис. 11.

Значения $k_{bh}(U_v,U_h)$ при закрытом клапане изменяются незначительно, поэтому корректирующий множитель будет выдавать значение ноль, отключая канал управления. Это позволит исключить неадекватную работу сушильной установки.

На рис. 12, 13 представлены переходные процессы сигналов управления нагревателем и воздушным клапаном.

Зашумленный вид сигналов обусловлен тем, что измерение с помощью АЦП подвержено шумам и ошибкам дискретизации. В результате шумовая составляющая усиливается ПИ-регулятором и значительно влияет на форму управляющих сигналов. Из приведенных переходных процессов сигналов управления видно стабильную и устойчивую работу без принятия ложных решений регулирования.

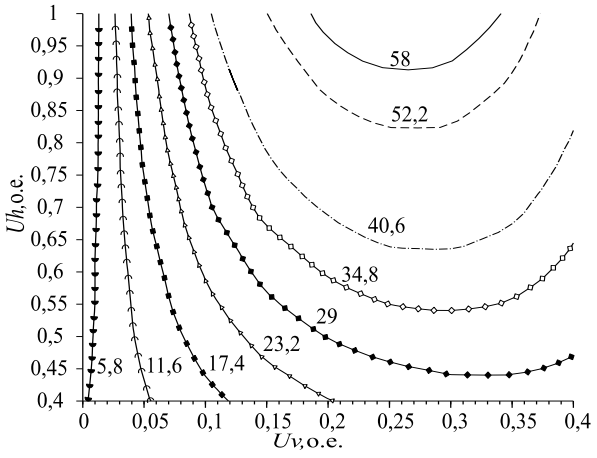

Рис. 11. Линии уровня поверхности $k_{bh}(U_v,U_h)$

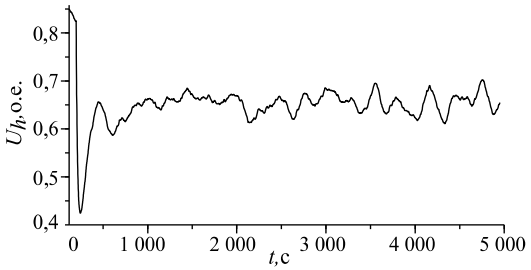

Рис. 12. Сигнал управления нагревателем

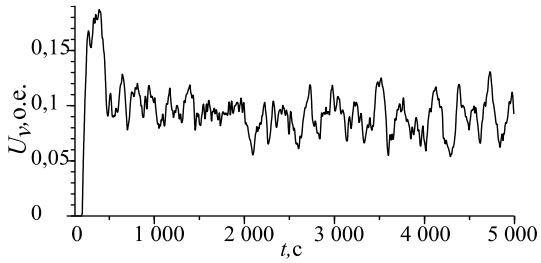

Рис. 13. Сигнал управления воздушным клапаном

Заключение

В настоящей работе предложена методика получения математической модели сушильной установки с помощью многочлена Лагранжа. Для четырехконтурной системы управления прототипом эксплуатируемой сушильной установки определены параметры ее динамической модели на основе экспериментальных данных с использованием программного среды CoDeSys. Расхождение экспериментальных и теоретических характеристик, полученных на модели, не превышает 3%.

В процессе исследований установлено, что коэффициенты передачи объекта, полученные с помощью многочлена Лагранжа, могут изменять знак, что влечет за собой появление положительных обратных связей, которые приводят систему в нерабочее состояние. Для исключения неадекватного поведения системы было предложено воспользоваться корректирующим множителем, который отключает непредсказуемый контур в зоне нечувствительности, где не требуется регулирование. Разработанная методика позволила исследовать устойчивые переходы из различных точек равновесного состояния на этапе моделирования.

Простота алгоритма и вычислительная легкость за счет матричных выражений и отсутствия рекуррентных соотношений позволяют реализовать алгоритм управления с коррекцией коэффициентов передачи на ПЛК в режиме реального времени. Для апробации результатов был использован недорогой процессор серии STM32f1xx. Результаты экспериментальных исследований показали, что обеспечивается предсказуемая и устойчивая работа промышленной сушильной установки. Отличительной особенностью алгоритма управления промышленной установкой по сравнению с лабораторным стендом является отсутствие смены знака статической поверхности $k_{bh}(U_v,U_h)$ коэффициента передачи объекта. Это связано с тем, что в ее конструкции по экономическим причинам не применяется конденсационная па-

нель. Однако, разработанный алгоритм перенастройки параметров ПИ-регуляторов позволяет избежать неустойчивых зон в областях с изменяющимися режимами работы оборудования, что гарантирует предсказуемость работы сушильной установки.

Литература

1. Кизина О.А. Анализ современных методов и оборудования для сушки древесины / О.А. Кизина, А.Л. Адамович, Ю.Г. Грозберг // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. B: Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 32–37.

2. Queslati A. Performance analysis of a new humid air dehumidifier / A. Queslati, A. Megriche // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 119. – P. 453–465.

3. Мусоров И.С. Осушитель воздуха на элементе Пельтье / И.С. Мусоров, С.Н. Торгаев, Д.С. Чертихина // Современные техника и технологии: сб. тр. XX Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14–18 апреля 2014 г.: в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 123–124.

4. Habeebullah B.A. Potential use of evaporator coils for water extraction in hot and humid areas // Desalination. – 2009. – Vol. 237, No. 1-3. – P. 330– 345.

5. Analysis of power demand calculation for freeze prevention methods of counter-flow heat exchangers used in energy recovery from exhaust air / A. Pacak, A. Jedlikowski, M. Karpuk, S. Anisimov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 133. – P. 842–860.

6. Бежан А.В. Математическое описание водяного аккумулятора тепла кубической формы // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – № 6. – С. 59–64.

7. Расчетно-экспериментальные исследования фазового перехода воды в инновационной термоэлектрической установке / Д.А. Тихомиров, С.С. Трунов, И.Г. Ершова, Н.Г. Ламонов, Д.В. Поручиков // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 3. – С. 28–34.

8. Abbott P.F. The estimation of humidity parameters / P.F. Abbott, R.C. Tabony // Meteorological Magazine. – 1985. – Vol. 114, No. 1351. – P. 49–56.

9. Alduchov O.A. Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure / O.A. Alduchov, R.E. Eskridge // Journal of Applied Meteorology. – 1996. – Vol. 35, No. 4. – P. 601–609.

10. Тараник В.А. Применение интерполяционного многочлена Лагранжа для функций со многими переменными // ScienceRise. – 2015. – № 8. – С. 69–76.

11. Identification of Mathematical Model of Drying Unit / F.P. Perevoshchikov, N.V. Vuong, A.K. Shabo, A.A. Shilin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2020. – Vol. 795, No. 1. – P. 012021.

12. Компьютерное моделирование визуальных интерфейсов виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, С.А. Панов // Научная визуализация. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 111–131.

13. Дмитриев В.М. Система виртуальных инструментов и приборов для автоматизации учебных и научных экспериментов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, С.А. Панов // Программные продукты и системы. – 2016. – Т. 29, № 3. – С. 154–162.

14. Дмитриев В.М. Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей SCADA-систем для управления сложными технологическими объектами / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа // Информатика и системы управления. – 2013. – № 2 (36). – С. 24–35.

15. An experimental investigation on the performance of a thermoelectric dehumidification system / P. Rakkwamsuk, P. Paromupatham, K. Sathapornprasath, C. Lertsatitthanakorn, S. Soponronnarit // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. – 2018. – Vol. 12, No. 4. – P. 4117–4126.

16. Методика постановки эксперимента в среде CoDeSys на примере системы управления вентиляцией / С.В. Прохоров, Нгуен Ван Выонг, А.А. Шилин, Г.И. Однокопылов, В.А. Шевчук // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 109–115.

17. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления: учеб. пособие / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Профессия, 2003. – 749 с.

Нгуен Ван Выонг
Аспирант отд. электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ)
Инженерной школы энергетики (ИШЭ)
Национального исследовательского
Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-(983)-346-84-54
Эл. почта: vuongoicolen@gmail.com

Шилин Александр Анатольевич
Д-р техн. наук, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-4761-7249
Тел.: +7-903-954-00-88
Эл. почта: shilin@tpu.ru

Букреев Виктор Григорьевич
Д-р техн. наук, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9861-9765
Тел.: +7-913-854-21-96
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

Перевощиков Филипп Владимирович
Магистрант ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-963-196-19-74
Эл. почта: fvp2@tpu.ru

Брянцев Андрей Анатольевич
Аспирант ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-421-11-93
Эл. почта: aa_bryantsev@mail.ru

Nguyen V.V., Shilin A.A., Bukreev V.G.,
Perevoshchikov F.V., Bryantsev A.A.

Synthesis of Regulators of the Drying Plant Control System Based on Statistical Data

In the article a method to carry out a synthesis of regulators of the drying plant control system is considered based on the integration of known statistical data by the Lagrange polynomial. An algorithm to correct the parameters of regulators in problematic modes of operation of the drying plant is proposed. It is shown that the control system developed and implemented on the PLC provides stable control of temperature and humidity during the drying of materials.

Keywords: drying plant control system, reconfigurable controller, Lagrange interpolation.
doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-2-56-63

References

1. Kizina O.A., Adamovich A.L., Grozberg Y.G. *Analiz sovremennyh metodov i oborudovaniya dlya sushki drevesiny* [Analysis of modern methods and equipment for wood drying]. *Vestnik of Polotsk State University. Series. B. Industry. Applied Sciences*, 2011, no. 3, pp. 32–37 (in Russ.).

2. Queslati A., Megriche A. Performance analysis of a new humid air dehumidifier. *Energy Procedia*, 2017, vol. 119, pp. 453–465.

3. Musorov I.S., Torgaev S.N., Chertikhina, D.S. *Osushitel' vozduha na elemente Pel't'e.* [Dehumidifier on the Peltier element]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii: sbornik trudov dvadcatoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, Tomsk, 14-18.04.2014: v 3 t*. Tomsk, TPU Publ., 2014, vol. 1, pp. 123–124 (in Russ.).

4. Habeebullah B.A. Potential use of evaporator coils for water extraction in hot and humid areas. *Desalination*, 2009, vol. 237, no. 1-3, pp. 330–345.

5. Pacak A., Jedlikowski A., Karpuk M., Anisimov S. Analysis of power demand calculation for freeze prevention methods of counter-flow heat exchangers used in energy recovery from exhaust air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 133, pp. 842–860.

6. Bejan A.V. *Matematicheskoe opisanie vodyanogo akkumulyatora tepla kubicheskoj formy* [Mathematical description of a cubic-shaped water heat accumulator]. *Energy Saving and Water Treatment*, 2017, no. 6, pp. 59–64 (in Russ.).

7. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Ershova I.G., Lamonov N.G., Poruchikov D.V. *Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya fazovogo perekhoda vody v innovacionnoj termoelektricheskoj ustanovke* [Computational and experimental studies of the water phase transition in an innovative thermoelectric installation]. *Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-industrial Complex*, 2019, no. 3, pp. 28–34 (in Russ.).

8. Abbott P.F, Tabony R.C. The estimation of humidity parameters. *Meteorological Magazine*, 1985, vol. 114, no. 1351, pp. 49–56.

9. Alduchov O.A., Eskridge R.E. Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, vol. 35, no. 4, pp. 601–609.

10. Taranik V.A. *Primenenie interpolyacionnogo mnogochlena Lagranzha dlya funkcij so mnogimi peremennymi* [Application of the Lagrange interpolation polynomial for functions with many variables]. *ScienceRise*, 2015, no. 8, pp. 69–76 (in Russ.).

11. Perevoshchikov F.V., Vuong N.V., Shabo A.K., Shilin A.A. Identification of Mathematical Model of Drying Unit. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 795, pp. 012021.

12. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Gandzha V.V., Panov S.A. *Komp'yuternoe modelirovanie vizual'nyh interfejsov virtual'nyh instrumentov i priborov* [Computer modeling of visual interfaces of virtual instruments and devices]. *Scientific Visualization,* 2016, vol. 8, no. 3, pp. 111–131 (in Russ.).

13. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Panov S.A. *Sistema virtual'nyh instrumentov i priborov dlya avtomatizacii uchebnyh i nauchnyh eksperimentov* [A system of virtual instruments and devices for automating educational and scientific experiments]. *Software Products and Systems,* 2016, vol. 29, no. 3, pp. 154–162 (in Russ.).

14. Dmitriev V.M., Gandzha T.V. *Princip formirovaniya mnogourovnevyh komp'yuternyh modelej SCADA – sistem dlya upravleniya slozhnymi tekhnologicheskimi obĕktami* [The principle of forming multi-level computer models of SCADA systems for managing complex technological objects]. *Computer Science and Control Systems,* 2013, no. 2 (36), pp. 24–35 (in Russ.).

15. Rakkwamsuk P., Paromupatham P., Sathapornprasath K., Lertsatitthanakorn C., Soponronnarit S. An experimental investigation on the performance of a thermoelectric dehumidification system. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2018, vol. 12, no. 4, pp. 4117–4126.

16. Prokhorov S.V., Vuong V. Nguen, Shilin A.A., Odnokopylov G.I., Shevchuk V.A. *Metodika postanovki eksperimenta v srede CoDeSys na primere sistemy upravleniya ventilyaciej* [Methodology for setting up an experiment in CoDeSys using the example of a ventilation control system]. *TUSUR reports,* 2019, vol. 22, no. 4, pp. 109–115 (in Russ.).

17. Besekersky V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. St Petersburg, vol. 22, no. 4, pp. 109–115 (in Russ.).

Vuong V. Nguyen
Postgraduate student, Power Engineering School,
Department of Electric Power and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-983-346-84-53
Email: vuongoicolen@gmail.com

Aleksander A. Shilin
Doctor of Science in Engineering, Professor
Power Engineering School, Department
of Electric Power and Electrical Engineering, NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-4761-7249
Phone: +7-903-954-00-88
Email: shilin@tpu.ru

Viktor G. Bukreev
Doctor of Science in Engineering, Professor,
Power Engineering School, Department
of Electric Power and Electrical Engineering, NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9861-9765
Phone: +7-913-854-21-96
Email: bukreev@tpu.ru

Filipp V. Perevoshchikov
Undergraduate student, Power Engineering School, Department
of Electric Power and Electrical Engineering, NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-963-196-19-74
Email: fvp2@tpu.ru

Andrey A. Bryantsev
Postgraduate student, Power Engineering School, Department
of Electric Power and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-421-11-93
Email: aa_bryantsev@mail.ru