

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЛОНЖЕРОНА ЛОПАСТИ

В статье рассматриваются вопросы разработки алгоритма управления процессом полимеризации для его реализации в системе автоматического управления (САУ). Алгоритм управления предназначен для формирования управляющего воздействия, для исполнительской системы исходя из желаемого значения температуры пресс-формы.

Устойчивость и качество процессов управления в системах автоматического управления (САУ) в значительной мере определяются законом (алгоритмом) управления. Формирование алгоритма зависит от цели управления, структуры и состава ее звеньев. Алгоритмы могут быть аналоговыми и дискретными. Алгоритмы управления в общем случае могут реализовываться программно, аппаратно или программно-аппаратно. Способ реализации алгоритма определяется целью управления и природой объекта управления (ОУ).

Для разработки алгоритма процесса полимеризации лонжерона необходимо провести его анализ. Процесс полимеризации является многофазным, так как в один и тот же момент времени вещества могут находиться в твердой, жидкой и газообразной фазе, в виде простых веществ (исходные вещества – стеклоткань и связующее) и образующегося полимера. Процесс полимеризации является многоэтапным (рисунок 1), в связи с двухступенчатым нагревом и наличием двух стадий стабилизации.

В общем случае лонжерон лопасти можно представить как полый цилиндр с различными сечениями по длине. Различия в геометрии сечений определяют разницу температуры в сечениях. Если разбить лонжерон на несколько участков, на которых геометрия сечения существенно не изменяется, то без учета многослойности конструкции можно записать дифференциальное уравнение теплообмена:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \Delta t(r, \tau) + \frac{\varepsilon \delta}{c} v_0 \frac{\partial v(r, \tau)}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где a – коэффициент теплопроводности,

v_0 – доля жидкости в начальный момент,

r – расстояние от центра сечения до стенки лонжерона,

τ – время процесса,

t – температура процесса,

c – коэффициент проводности потенциала массы,

ε – критерий фазового превращения.

Коэффициент теплопроводности в данном уравнении является приведенным. Он может быть приблизительно определен для каждого типа стеклопластика с учетом количества слоев, направления стеклянных волокон, доли стеклонаполнителя, доли связующего. Например, для ортогонального армированного стеклопластика в направлениях осей упругой симметрии x и y в плоскости армирования могут быть вычислены по формулам [1, с. 175]:

$$a_x = (a_{\parallel} c_{0x} + a_{\perp} c_{0y}) \frac{1}{c_0} \quad (2)$$

$$a_y = (a_{\parallel} c_{0x} + a_{\perp} c_{0y}) \frac{1}{c_0}, \quad (3)$$

$$a_z = a_{\perp}, \quad (4)$$

где c_{0x} и c_{0y} – объемное содержание волокна в направлениях x и y , то есть отношение объемов волокон, ориентированных в направлениях x и y , к объему стеклопластика.

Формулы (2)-(3) показывают, что приведенные коэффициенты теплопроводности имеют некоторый разброс значений в связи с различным, в пределах допуска, качеством исходного препрега. (Препрег – пропитанная связующим стеклоткань для изготовления лонжерона.) Входной контроль качества исходных материалов призван обеспечить допустимый разброс коэффициента теплопроводности. Формулы (2) – (4) используются для проектирования стеклопластиков, они не

учитывают изменения коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры, но являются приемлемыми для приближенных расчетов. Из этого следует, что изменения коэффициента теплопроводности в процессе полимеризации требуют применения идентификации процесса полимеризации в реальном времени, и в то же время изменения коэффициента теплопроводности являются незначительными. Таким образом, процесс полимеризации лонжерона лопасти можно рассматривать как квазистационарный процесс, что существенно облегчает анализ процесса полимеризации и синтез САУ.

Для анализа квазистационарных процессов применяются методы замороженных реакций и замороженных коэффициентов. Для процесса полимеризации удобнее применять метод замороженных реакций. Он состоит в том, что на некотором интервале коэффициенты дифференциального уравнения, описывающего нестационарный процесс, изменяются незначительно, и следовательно, для его описания может быть применена некоторая передаточная функция эквивалентной ста-

онарной системы. В результате применения графоаналитического метода решения дифференциальных уравнений передаточная функция процесса полимеризации лонжерона при нагревании прелстает в виде:

$$W(p) = Q_{нач} + \frac{ke^{-\tau p}}{p}, \quad (5)$$

где $Q_{нач}$ – температура, начиная с которой производится нагрев [4].

Формула (5) соответствует изодромному звену, представляющему собой последовательное соединение пропорционального безинерционного звена и звена с запаздыванием. Она получена при подаче на вход нагревателя мощности 608 КВт/час и представляет собой передаточную функцию последовательного соединения нагревателя и пресс-формы с полимеризуемым лонжероном. На рисунке 2 а представлена функциональная схема идентифицируемой системы на рисунке 2 б – структурная схема идентифицированного объекта.

Желаемое значение выходной величины – температуры процесса задается с по-

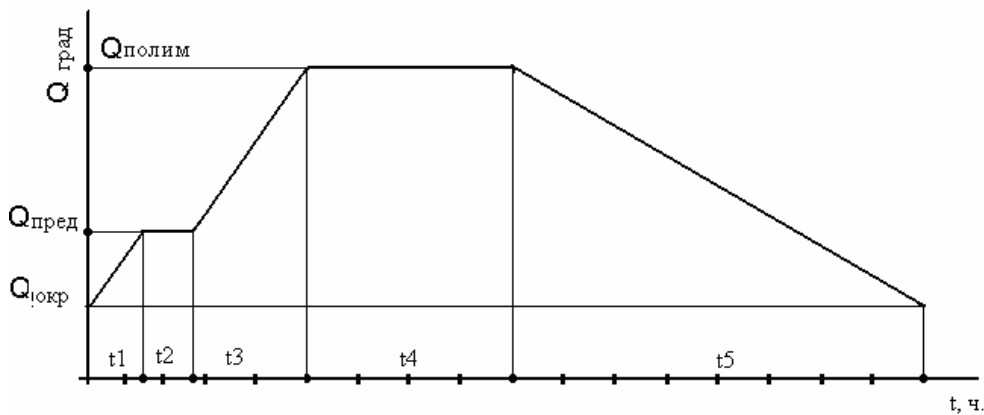


Рисунок 1. Графическое изображение функции цели по контуру температуры для процесса полимеризации, где $Q_{окр}$ – температура окружающей среды, $Q_{пред}$ – температура предварительного нагрева, $Q_{полим}$ – температура полимеризации, $t1$ – время нагрева от $Q_{окр}$ до $Q_{пред}$, $t2$ – время выдержки при $Q_{пред}$, $t3$ – время нагрева до $Q_{полим}$, $t4$ – время выдержки $Q_{полим}$, $t5$ – время охлаждения

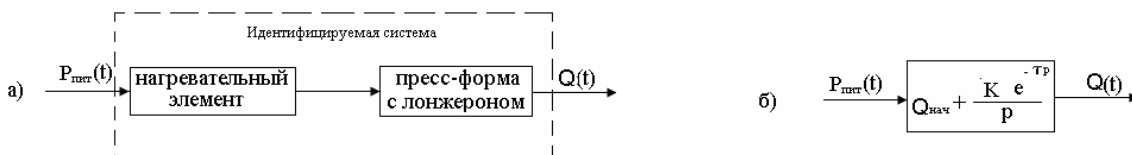


Рисунок 2. а) – функциональная схема идентифицируемой системы, б) структурная схема идентифицируемой системы.

мощью эквивалентных передаточных функций $W_{жс}(p)$, в соответствии с рисунком 1. Структурной схеме контура температуры ТП полимеризации, представленной на рисунке 3, соответствует передаточная функция управляющего устройства САУ ТП полимеризации лонжерона:

$$W_{жс}(p) = \frac{W_{кв}(z)W_{ТП}(p)W_{ОУ}(p)}{1 + W_{кв}(z)W_{ТП}(p)W_{ОУ}(p)W_{ДАТ}(p)} \quad (6)$$

где $W_{кв}(p)$ – передаточная функция управляющего устройства, $W_{ТП}(p)$ – передаточная функция исполнительной системы, представленной тиристорным преобразователем, $W_{ОУ}(p)$ – передаточная функция процесса полимеризации.

Вычисляется $W_{кв}(p)$ на каждом из участков технологического процесса, тогда:

$$W_{кв}(p) = \frac{W_{жс}(p)}{W_{ТП}(p)W_{ОУ}(p)[1 - W_{жс}(p)W_{ДАТ}(p)]} \quad (7)$$

Тогда передаточная функция регулятора температуры определяется:

– на участке 1:

$$W_{кв1}(p) = \frac{1}{K_{ТП}K_{ОУ}} \frac{v(1 + Q_{ОКР}p/v)(T_{ТП}p + 1)p}{K_{ДАТ}^v + p(1 - K_{ДАТ}Q_{ОКР})} =$$

$$= ([T_{ТП}Q_{ОКР}]p^4 + [T_{ТП}Q_{ОКР} + vT_{ТП}]p^3 + [Q_{ОКР} + T_{ТП}]p^2 + vp) \cdot$$

$$\cdot ([K_{ТП}K_{ОУ} - K_{ТП}K_{ОУ}K_{ДАТ}Q_{ОКР}]p - K_{ТП}K_{ОУ}K_{ДАТ}^v)^{-1} \quad (8)$$

– на участке 2:

$$W_{кв2}(p) = \frac{(Q_{ПРЕД} - Q_{ОКР})p(T_{ТП}p + 1)(T_{ОУ}p + 1)}{K_{ТП}K_{ОУ}(1 - (Q_{ПРЕД} - Q_{ОКР})K_{ДАТ})} =$$

$$= ([T_{ТП}(Q_{ПРЕД} - Q_{ОКР})]p^3 + [T_{ТП}Q_{ПРЕД} - Q_{ОКР}]p^2 + [(Q_{ПРЕД} - Q_{ОКР})]p) \cdot$$

$$\cdot ([K_{ОУ}K_{ТП}(1 - Q_{ПРЕД}K_{ДАТ} + K_{ДАТ}Q_{ОКР})]p)^{-1} \quad (9)$$

– на участке 3:

$$W_{кв3}(p) = \frac{1}{K_{ТП}K_{ОУ}} \frac{v(1 + Q_{ПРЕД}p/v)(T_{ТП}p + 1)p}{K_{ДАТ}^v + p(1 - K_{ДАТ}Q_{ПРЕД})} =$$

$$= ([T_{ТП}Q_{ПРЕД}]p^4 + [T_{ТП}Q_{ПРЕД} + vT_{ТП}]p^3 + [Q_{ПРЕД} + T_{ТП}]p^2 + vp) \cdot$$

$$\cdot ([K_{ТП}K_{ОУ} - K_{ТП}K_{ОУ}K_{ДАТ}Q_{ПРЕД}]p - K_{ТП}K_{ОУ}K_{ДАТ}^v)^{-1} \quad (10)$$

– на участке 4:

$$W_{кв4}(p) = \frac{(Q_{ПОЛИМ} - Q_{ОКР})p(T_{ТП}p + 1)(T_{ОУ}p + 1)}{K_{ТП}K_{ОУ}(1 - (Q_{ПОЛИМ} - Q_{ОКР})K_{ДАТ})} =$$

$$= ([T_{ТП}(Q_{ПОЛИМ} - Q_{ОКР})]p^3 + [T_{ТП}(Q_{ПОЛИМ} - Q_{ОКР})]p^2 + [(Q_{ПОЛИМ} - Q_{ОКР})]p) \cdot$$

$$\cdot ([K_{ОУ}K_{ТП}(1 - Q_{ПОЛИМ}K_{ДАТ} + K_{ДАТ}Q_{ОКР})]p)^{-1} \quad (11)$$

Передаточные функции управляющего устройства соответствуют цели управления, заданной требованиями технологии. Они представляют собой выражения 4-го порядка.

Особенностью управления процессом полимеризации является многоэтапность, на каждом этапе решается своя функция цели. Для достижения общей цели управления процессом полимеризации необходима связь во временной области функций управляющего устройства для каждого этапа. Такая связь может быть реализована с применением компьютерного управления. Компьютерное (цифровое) управление по сравнению с аналоговым имеет ряд преимуществ. Кроме непосредственного управления цифровое управляющее устройство (ЭВМ) может выполнять операции контроля состояния элементов и устройств системы. В общем случае на ЭВМ может возлагаться решение задач обслуживания нескольких каналов управления, с разделением функций управления по времени или приоритету.

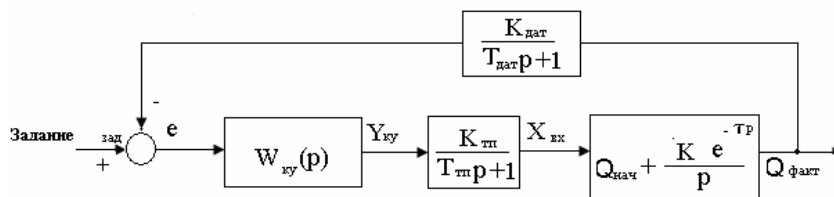


Рисунок 3. Структурная схема САУ по контуру температуры

Таким образом, применение компьютерного управления позволит применить вместо пары ленточных нагревателей в верхней и нижней части пресс-формы несколько пар нагревателей на различных участках пресс-формы. При этом каждый участок должен управляться в соответствии с заданной целью управления процессом полимеризации. Таким способом может быть обеспечена однородность нагрева пресс-формы лонжерона, которая является одним из требований к ведению процесса полимеризации. На рисунке 4 представлена функциональная схема САУ ТП полимеризации, использующая секционные нагреватели.

Применение ЭВМ ведет к необходимости дискретного представления алгоритма управления. В цифровых системах алгоритмы и корректирующие устройства реализуются программным путем в виде вычислительных процедур, организованных в разностных уравнениях вида:

$$u(i) = \frac{1}{q_0} [-q_1 u(i-1) - q_2 u(i-2) - \dots - q_n u(i-k) + p_0 x(i+s-k) + p_1 x(i+s-k-1) + \dots + p_s x(i-k)] \quad (12)$$

Разностное уравнение (12) [3, с. 448] может быть физически реализовано, если для вычисления значений управляющего воздействия в момент времени $t = dt \cdot i$, то есть $u(i)$ ошибки, где dt – шаг квантования. В общем случае в цифровой системе могут быть

реализованы и непрерывные алгоритмы управления, тогда передаточная функция цифрового управляющего устройства равна 1.

Переход к выражению (12) возможен двумя способами [2, с. 295].

Один из способов – с помощью замены $\ddot{p} = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} = w$ и умножением полученного результата на $\frac{2}{z+1}$. То есть

$$W(p) = \frac{2}{z+1} W\left(\frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}\right) \quad W(z) \cong W(p) \cdot (13)$$

В численных методах этот прием соответствует методу трапеций. Методу прямоугольников соответствует:

- способ прямой разности – $\ddot{p} = \frac{z-1}{T}$
- способ обратной разности – $\ddot{p} = \frac{z-1}{zT}$

с умножением результата на $1/z$. Здесь везде исходное $p = \ln z/dt$.

$$[z = e^{pdt} \approx 1 + pdt; \quad z = 1/e^{-pdt} \approx 1/(1 - dt p);$$

$$z = e^{pdt/2} / e^{-pdt/2} \approx \left(1 + \frac{pdt}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{pdt}{2}\right) \quad (14)$$

Наиболее простой способ получения разностных уравнений, описывающих дискретные САУ, использует аппроксимацию производных конечными разностями. Формулы (8) – (11) описывают алгоритм корректирующего устройства для различных участков изменения температуры в ходе ТП полиме-

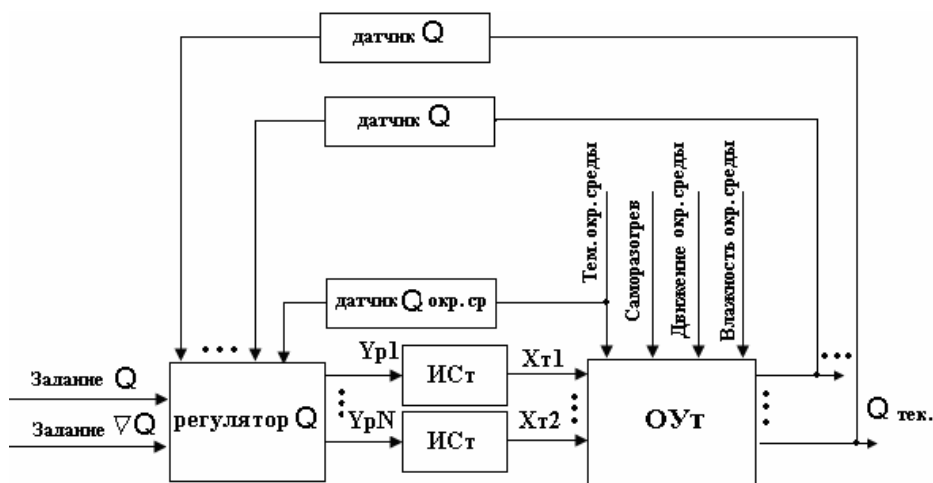


Рисунок 4. Функциональная схема САУ по контуру температуры при использовании секционных нагревателей

ризации лонжерона в терминах непрерывных систем в виде передаточных функций.

$$W_{KV}(p) = \frac{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_1 p + a_0}. \quad (15)$$

Применив для перехода от непрерывной модели управляющего устройства к эквивалентной дискретной аппроксимацию производных конечными разностями, получим:

$$a_1 \Delta y + a_0 y = b_4 \Delta^4 x + b_3 \Delta^3 x + b_2 \Delta^2 x + b_1 \Delta x + b_0 x. \quad (16)$$

Так как конечные разности:

$$\begin{aligned} \Delta y[n] &= \frac{y[n] - y[n-1]}{\Delta t} \\ \Delta x[n] &= \frac{x[n] - x[n-1]}{\Delta t} \\ \Delta^2 x[n] &= \frac{x\Delta[n] - x\Delta[n-1]}{\Delta t} = \frac{x[n] - 2x[n-1] + x[n-2]}{\Delta^2 t} \\ \Delta^3 x[n] &= \frac{x\Delta^2[n] - x\Delta^2[n-1]}{\Delta t} = \\ &= \frac{x[n] - 3x[n-1] + 2x[n-2] - x[n-3]}{\Delta^3 t} \\ \Delta^4 x[n] &= \frac{x\Delta^3[n] - x\Delta^3[n-1]}{\Delta t} = \\ &= \frac{x[n] - 3x[n-1] + 2x[n-2] - x[n-3]}{\Delta^3 t}, \end{aligned}$$

где $\Delta t = dt$, то выражение (16) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{a_1}{\Delta t} (y[n] - y[n-1]) + a_0 y[n] &= \frac{b_4}{\Delta^4 t} (x[n] - 4x[n-1] + \\ &+ 3x[n-2] - 2x[n-3] + x[n-4]) + \\ &+ \frac{b_3}{\Delta^3 t} (x[n] - 3x[n-1] + 2x[n-2] - x[n-3]) + \\ &+ \frac{b_2}{\Delta^2 t} (x[n] - 2x[n-1] + x[n-2]) + \\ &+ \frac{b_1}{\Delta t} (x[n] - x[n-1]) + b_0 x[n] \end{aligned}$$

Произведя замены:

$$\left. \begin{aligned} B_4 &= \frac{b_4}{\Delta^4 t} + \frac{b_3}{\Delta^3 t} + \frac{b_2}{\Delta^2 t} + \frac{b_1}{\Delta t} + b_0, \\ B_3 &= -4 \frac{b_4}{\Delta^4 t} - 3 \frac{b_3}{\Delta^3 t} - 2 \frac{b_2}{\Delta^2 t} - \frac{b_1}{\Delta t} \\ B_2 &= 3 \frac{b_4}{\Delta^4 t} + 2 \frac{b_3}{\Delta^3 t} + \frac{b_2}{\Delta^2 t} \\ B_1 &= -2 \frac{b_4}{\Delta^4 t} - \frac{b_3}{\Delta^3 t}, \quad B_0 = \frac{b_4}{\Delta^4 t} \\ A_1 &= \frac{a_1}{\Delta t} + a_0, \quad A_0 = a_0 \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

получим:

$$y[n] = (B_4 x[n] + B_3 x[n-1] + B_2 x[n-2] -$$

$$- B_1 x[n-3] + B_0 x[n-4] - A_0 y[n-1]) / A_1, \quad (18)$$

где вход регулятора $x[n] = x_{зад}[n] - y_{факт}[n]$.

Для связи во временной области функций определения величины управляющего сигнала используются следующие функции переключения:

– на этапе предварительного нагревания (соответствует t_1) с заданной скоростью v до температуры предварительного нагрева – $T_{пред}$:

если $y(t) = Q_{ФАКТ} < Q_{ПРЕД}$ то $y(n \tau)$ определяется из (8),

иначе $t_1 = (n-1) \tau$,

– на этапе выдержки (соответствует t_2):

если $n \tau > t_1$ и $n \tau < t_1 + t_2$, то $y(n \tau)$ определяется из (9),

иначе $t_2 = (n-1) \tau$ – время окончания предварительной выдержки,

– на этапе нагревания

если $y(t) = Q_{ФАКТ} < Q_{ПОЛИМ}$ то $y(n \tau)$ определяется в соответствии с (10),

иначе $t_3 = (n-1) \tau$ – время от начала процесса до получения температуры полимеризации,

– на этапе полимеризации

если $n \tau > t_3$ и $n \tau < t_3 + t_4$ то $y(n \tau)$ определяется из (11)

иначе $t_4 = (n-1) \tau$ – время окончания стадии полимеризации,

где $Q_{ФАКТ}$ – фактическая температура процесса полимеризации, t_1 – время, необходимое для достижения температуры предварительного нагрева $Q_{ПРЕД}$, t_2 – время выдержки на температуре предварительного нагрева, t_3 – время для достижения температуры полимеризации, $Q_{ПОЛИМ}$ – температура полимеризации, t_4 – время полимеризации.

Графически алгоритм управления процессом полимеризации по температуре иллюстрирует схеме алгоритма, представленная на рисунке 5.

Обозначив за $Q_{ФАКТ}[n]$ – фактическое значение выходы процесса полимеризации получим:

– на этапе предварительного нагрева ожидаемое выходное воздействие определяется выражением:

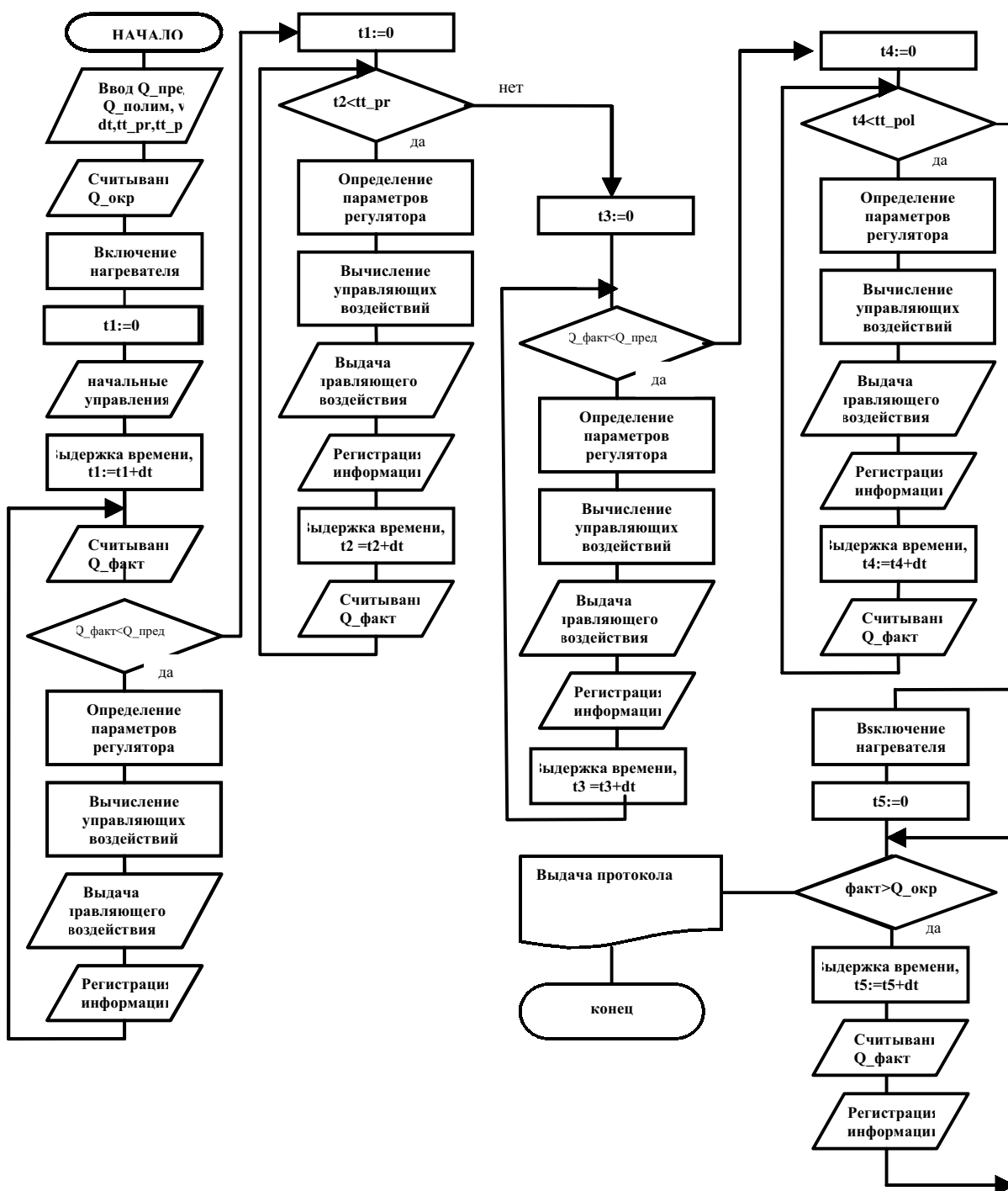


Рисунок 5. Схема алгоритма управления в САУ ТП полимеризации

$$\begin{aligned} & (Q_{\text{ФАКТ}}[(n-1)\tau] + \Delta Q_{\text{ФАКТ}}[(n-1)\tau])x_{\text{ВХ}}(n\tau) = \\ & = Q_{\text{ФАКТ}}[n-1] + v\tau, \text{ то} \\ & x_{\text{ВХ}}(n\tau) = (Q_{\text{ФАКТ}}[n-1] + v\tau) / (Q_{\text{ФАКТ}}[n-1] + \\ & + \Delta Q_{\text{ФАКТ}}[n-1] + v\tau) \end{aligned} \quad (19)$$

– на этапе предварительной выдержки:

$$x_{\text{ВХ}}(n\tau) = Q_{\text{пред}} / (Q_{\text{ФАКТ}}[n-1] + \Delta Q_{\text{ФАКТ}}[n-1] + v\tau) \quad (20)$$

– на этапе нагревания до температуры полимеризации:

$$\begin{aligned} & x_{\text{ВХ}}(n\tau) = (Q_{\text{ФАКТ}}[n-1] + v\tau) / \\ & / (Q_{\text{ФАКТ}}[n-1] + \Delta Q_{\text{ФАКТ}}[n-1] + v\tau) \end{aligned} \quad (21)$$

– на этапе полимеризации:

$$\begin{aligned} & x_{\text{ВХ}}(n\tau) = Q_{\text{ПОЛИМ}} / (Q_{\text{ФАКТ}}[n-1] + \\ & + \Delta Q_{\text{ФАКТ}}[n-1] + v\tau). \end{aligned} \quad (22)$$

Поскольку $x_{\text{ВХ}}(n\tau)$ является выходом исполнительной системы, а ее вход является выходом корректирующего устройства, то из выражения

$$W_{\text{ИС}}(p) = \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}p + 1} \quad (23)$$

в конечно-разностной форме получим:

$$\frac{a_1}{\Delta t} (y[n] - y[n-1]) + a_0 y[n] = b_0 x[n] \quad (24)$$

Введя обозначения:

$$\left. \begin{aligned} & b_0 = K_{\text{ТП}}, \quad a_1 = T_{\text{ТП}}, \quad a_0 = 1 \\ & B_0 = b_0 \\ & A_1 = \frac{a_1}{\Delta t} + a_0, \quad A_0 = -\frac{a_1}{\Delta t} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

и перейдя к конечно-разностной форме, получим:

$$\begin{aligned} & y_{\text{КВ}}(n\tau) = \\ & = (x_{\text{ВХ}}[n] * A[1] + x_{\text{об}}[n-1] - A[0]) / B[0] \end{aligned} \quad (26)$$

Выводы и результаты:

1. Процесс полимеризации можно считать квазистационарной системой и описать как стационарную систему, так как коэффициент теплопроводности во времени изменяется незначительно.

2. Передаточная функция процесса полимеризации служит основой для определения передаточных функций управляющего устройства в САУ.

3. Применение компьютерного управления позволяет организовать секционный нагрев пресс-формы и выполнять переключенные функции управляющего устройства.

Список использованной литературы:

1. Конструкционные стеклопластики / Альперин В.И., Корольков Н.В., Мотавкин А.В., Рогинский С.Л., Телешев В.А. М.: Химия, 1979. – 360 с., ил.
2. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2003. – 302 с.: ил.
3. Теория автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2004. – 752 с. – (Серия: Специалист)
4. Экспериментальное построение переходной характеристики ТП полимеризации лонжерона лопасти // Грачева Л.Н., Тюков Н.И., Закурдаева Е.А. Республиканская научно-практическая конференция, Уфа, 2004.