УДК 681.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ВЫТЯЖКИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Б.К. Чостковский, Р.Ш. Галиуллин

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

В статье рассматривается объект управления – зона перетяжки оптического волокна, на выходе объекта получают волокно заданного диаметра. Управление диаметром волокна осуществляется путем изменения скорости вытяжки и температуры печи расплава заготовки. Система управления зоной перетяжки построена с учетом тренда диаметра заготовки.

Ключевые слова: *оптическое волокно, зона перетяжки, скорость вытяжки, натяжение вытяжки, диаметр волокна.*

Как известно, оптическое волокно (ОВ) как физическая среда для передачи информации имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с прочими, а именно: широкая полоса частот и низкое затухание сигнала обеспечивает передачу больших объемов информации на большие расстояния без необходимости регенерации сигнала. Оптическое волокно нечувствительно к электромагнитным полям, что предотвращает возникновение наведенных помех при передаче информации, волоконно-оптические линии связи имеют значительно меньшие объем и массу в расчете на единицу передаваемой информации, чем любые другие.

Технологический процесс изготовления градиентных оптических волокон состоит из двух технологических этапов – изготовления заготовки (преформы) с параболическим профилем показателя преломления сердцевины и последующей вытяжки волокна из преформы.

Оптические свойства волокна в значительной степени определяются технологическим режимом вытяжки – ее скоростью и натяжением. Объектом управления является зона перетяжки – так называемая луковица. Целью управления является вытяжка волокна заданного диаметра d_0 при поддержании заданного режима вытяжки, конкретного для каждой вытягиваемой преформы, – скорости вытяжки v_{T_0} и натяжения вытяжки F_0. При этом управление диаметром осуществляется малым изменением скорости вытяжки v_T, а управление натяжением – малым изменением температуры T_0 высокотемпературной печи. Для реализации оптимального управления необходимо знание математической модели объекта управления, для чего произведена идентификация следующих передаточных функций [1]:

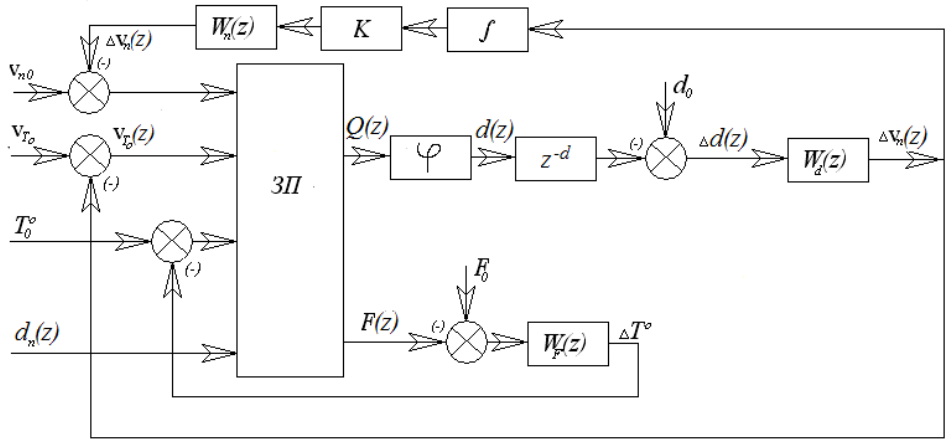
$$W_Q(z) = \frac{Q(z)}{v_n(z)} = \frac{0{,}0337 \cdot z^{-1}}{1 - 2{,}216 \cdot z^{-1} + 1{,}713 \cdot z^{-2} - 0{,}4639 \cdot z^{-3}}, \qquad (1)$$

Борис Константинович Чостковский – д.т.н., профессор.
Ренат Шагитович Галиуллин – аспирант.

где $W_Q(z)$ – дискретная модель зоны перетяжки, $Q(z)$ – поток расплава, $v_n(z)$ – скорость подачи преформы.

Данная передаточная функция является частью математической модели, которая позволит синтезировать оптимальное управление процессом вытяжки.

На рис. 1 показана структурная схема управления системой вытяжки волокна, содержащая контур автоматического управления диаметром волокна и натяжением вытяжки.



Р и с . 1. Структурная схема системы управления технологическим процессом вытяжки волокна:

ЗП – зона перетяжки; d – запаздывание, равное времени движения вытягиваемого волокна от луковицы до датчика диаметра; $W_n(z)$ – цифровой регулятор скорости подачи преформы; $W_F(z)$ – цифровой регулятор натяжения вытяжки; $W_d(z)$ – цифровой регулятор диаметра волокна; К – коэффициент пропорциональности между сечениями волокна и преформы; φ – статический коэффициент, отражающий взаимосвязь диаметра волокна и потока расплава, поступающего из луковицы

Регулятор контура стабилизации диаметра выбран как цифровой аналог пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора в связи с наличием запаздывания τ в контуре, равного времени прохождения волокна от луковицы, где оно формируется до датчика диаметра:

$$W_d(z) = \frac{q_0 + q_1 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \tag{2}$$

где настройки q_0 и q_1 выбираются из условия обеспечения ПИ закона регулирования.

С учетом того, что диаметр преформы может иметь тренд, который при работе контура стабилизации диаметра волокна приведет к появлению тренда скорости v_T, в систему вводится устройство оценивания скользящего среднего:

$$\bar{v}_T(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^{t} v_T(t)dt\,. \tag{3}$$

При появлении отклонения $\bar{v}_T(t)$ от заданной скорости вытяжки v_{T_0} предлагается ввести коррекцию скорости подачи преформ v_n апериодическим регулятором с передаточной функцией [2]:

$$W_n(z) = \frac{q_0 \cdot A(z)}{1 - q_0 \cdot B(z)} = \frac{29{,}7 - 0{,}0337 \cdot z^{-1} - 50{,}8 \cdot z^{-2} - 13{,}82 \cdot z^{-3}}{1 - z^{-1}}, \qquad (4)$$

где параметр q_0 определяется как величина, обратная сумме коэффициентов полинома $B(z)$; $A(z)$ и $B(z)$ – числитель и знаменатель дискретной модели зоны перетяжки по скорости подачи преформы [1].

Время переходного процесса корректировки скорости v_n равно трем интервалам квантования по времени цифровой системы управления.

Экспериментальные исследования процесса вытяжки в различных режимах позволили математически описать зависимость диаметра волокна от скорости вытяжки в форме непрерывной передаточной функции вида

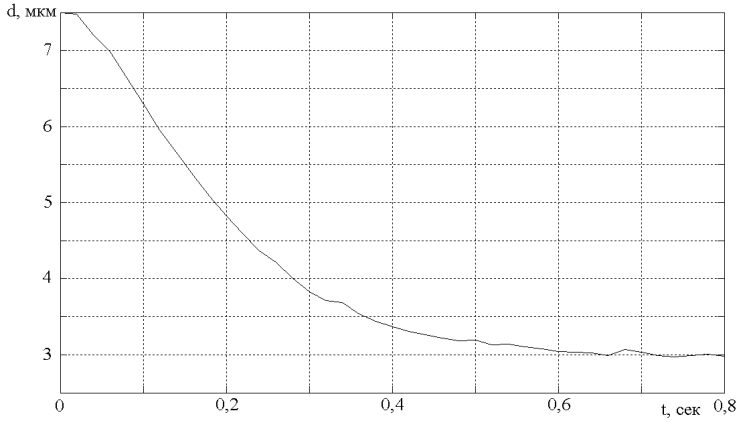
$$W_T(p) = \frac{d(p)}{v_T(p)} = \frac{K_0 \cdot e^{-\tau p}}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \qquad (5)$$

где коэффициент передачи K_0, время запаздывания τ и параметры T_1 и T_2 определяются технологическим режимом процесса вытяжки.

При вытяжке на скорости 26 м/мин при десятипроцентном приращении скорости зарегистрирована диаграмма $d(t)$ (рис. 2). По отсчетам переходного процесса, взятого с интервалом времени $T_0 = 0{,}2c$, выполнена МНК-оценка параметров дискретной передаточной функции зоны перетяжки:

$$W_T(z) = \frac{d(z)}{v_T(z)} = \frac{1{,}086 \cdot z^{-1}}{1 - 0{,}965 \cdot z^{-1} + 0{,}115 \cdot z^{-2}}, \qquad (6)$$

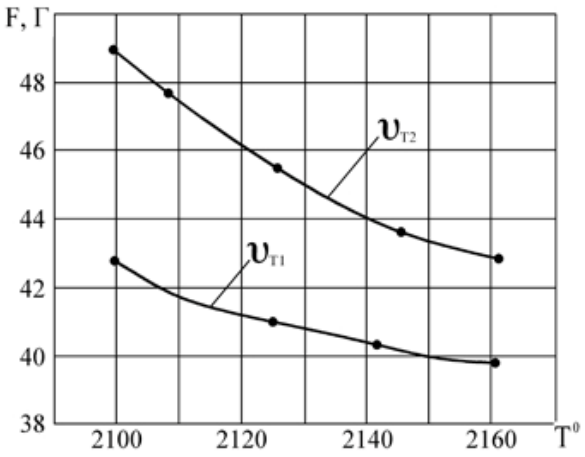
где $K_0 = -1{,}81 \dfrac{мкм}{м/мин}$.



Р и с . 2. Переходный процесс при изменении скорости вытяжки

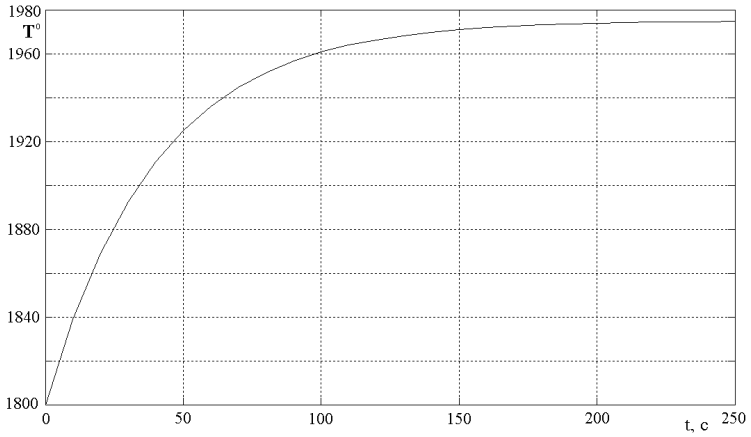
Требуемый коэффициент затухания одномодовых и многомодовых ОВ достигается только при строгом обеспечении вытяжки с технологическими режимными параметрами, которые задаются конкретными для каждой вытягиваемой преформы и поддерживаются с заданной точностью посредством применения соответствующих контуров автоматической стабилизации. Синтез структуры и оптимизация цифровых регуляторов данных контуров требуют знания динамических моделей тех звеньев системы, которые рассматриваются как объекты управления.

При заданной скорости вытяжки v_T, поддерживаемой приводом тягового колеса, необходимое натяжение вытяжки достигается регулированием температуры высокотемпературной печи (ВТП), в которой происходит плавление нижнего конца вводимой со скоростью v_n преформы и образование зоны перетяжки. На рис. 3 представлены статические характеристики зоны перетяжки, полученные при двух разных скоростях вытяжки $v_{T2} > v_{T1}$.



Р и с . 3. Статические характеристики зоны перетяжки

На рис. 4 показан переходный процесс ВТП, снятый экспериментально при подаче 40%-го перепада мощности печи.



Р и с . 4. Переходный процесс ВТП

Данная печь охватывается обратной связью с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором, оптимальная настройка параметров которого позволяет существенно улучшить динамику, на порядок уменьшив время переходного процесса. В результате управляемая ВТП имеет динамику апериодического звена первого порядка, дискретная передаточная функция которого в нормированном виде при интервале квантования по времени $T_0 = 0{,}6c$ имеет вид

$$W_{ВТП}(z) = \frac{0{,}375z^{-1}}{1 - 0{,}625z^{-1}}. \qquad (7)$$

Температура ВТП $T^0_{ВТП}$ может рассматриваться как входное воздействие зоны перетяжки, температура которой $T^0_{П}$ определяет объем и поверхностное натяжение зоны перетяжки и, соответственно, натяжение вытяжки F.

Непрерывная передаточная функция зоны перетяжки зависит от ее длины B, скорости вытяжки v_T и может быть описана в виде [3]

$$W_L(p) = \frac{T^0_L(p)}{T^0_{ВТП}} = \frac{e^{-p\tau}}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}, \qquad (8)$$

где T_1 – постоянная времени, определяемая гидродинамическими свойствами луковицы; T_2 – постоянная времени, определяющая время нагрева луковицы; τ – время запаздывания, определяемое длиной луковицы.

При печном нагреве наибольшую роль играют не гидродинамические, а тепловые свойства зоны перетяжки, что позволяет в выражении (8) учитывать только T_2 и время запаздывания τ, произведение которых пропорционально квадрату длины луковицы.

При скорости вытяжки $v_T = 1\frac{м}{с}$ и длине луковицы *B=30 мм* оценены параметры (8): $\tau = 2{,}4$ с, $T_0 = 0{,}03c$, $T_2 = 1{,}67c$.

Для величины такта $T_0 = 0{,}6c$ дискретная передаточная функция зоны перетяжки имеет вид

$$W_L(z) = \frac{1{,}1966z^{-1}}{1 - 0{,}1441z^{-1} + 0{,}0649z^{-2}} \cdot z^{-4}. \qquad (9)$$

Передаточные функции (7) и (8) были использованы для имитационного моделирования зоны перетяжки.

На имитационной модели методом Гаусса – Зайделя определены оптимальные настройки цифрового регулятора, соответствующие минимуму квадратичной интегральной оценки. Передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_P(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{0{,}24 - 0{,}19^{-1} + 0{,}03z^{-2}}{1 - z^{-1}}. \qquad (10)$$

Цифровая управляемая система с данным регулятором обладает высоким быстродействием и достаточным запасом устойчивости.

Необходимо подчеркнуть, что параметры передаточных функций существенно зависят от режима вытяжки, который индивидуален для каждой вытягиваемой преформы. Поэтому оптимальность автоматического управления процессом вытяжки может быть обеспечена либо включением идентификатора в структуру системы управления, либо разработкой алгоритма управления, обладающего свойствами робастности к параметрам модели объекта управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чостковский Д.Б.* Структурный синтез системы управления процессом вытяжки градиентных оптических волокон // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – Самара, 2010. – Вып. 4. – С. 72-77.
2. *Изерман Р.* Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. – 542 с.
3. *Дианов Е.М. и др.* Динамика тепловых процессов при вытяжке кварцевых волоконных световодов / Е.М. Дианов, В.В. Кашин, С.М. Перминов, В.Н. Перминова, С.Я. Русанов, В.К. Сысоев // ЖТФ. – 1987. – Т. 57. – Вып. 8. – С. 1562-1569.

Статья поступила в редакцию 3 мая 2011 г.

UDC 681.5

MATHEMATICAL MODELING AND TECHNOLOGICAL PROCESS MANAGEMENT OF OPTICAL FIBRE EXTRACTION

B.K. Tchostkovski, R.Sh. Galiullin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

The article refers to optical fibre extraction zone as a controlled object with on output of an optical fibre with given diameter. The fibre diameter is controlled by varying furnace temperature and extraction speed. The control system of extraction zone is desighed with consideration of blank's diameter trend.

Keywords*: optical fibre, zone перетяжки, speed of an extract, an extract tension, diameter of a fibre.*

B.K. Tchostkovski – Doctor of Technical Sciences, Professor.
R.Sh. Galiullin – Postgraduate student.