

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В ЗОНЕ ДОЗИРОВАНИЯ ОДНОЧЕРВЯЧНОГО ЭКСТРУДЕРА ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ГРАДИЕНТЕ ДАВЛЕНИЯ¹

В.Н. Митрошин

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

Предложена методика определения характеристик гармонических возмущающих воздействий в системе стабилизации давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера. Даны рекомендации по синтезу системы автоматизации процесса изолирования проводных кабелей связи с учётом реальных возмущений, позволяющие гарантировать обеспечение требуемого качества кабеля как канала связи с учетом его полосы пропускания.

Ключевые слова: производство кабелей, автоматизация, давление расплава.

Формирование обобщенного (глобального) параметра качества кабеля как канала связи осуществляется на всех технологических операциях его изготовления.

Основной технологической операцией изготовления проводных кабелей связи, в наибольшей степени определяющей формирование глобального параметра качества, является покрытие токопроводящей жилы полимерной изоляцией. Изолирование осуществляется на экструзионных линиях, главными элементами которых являются одночервячный пластицирующий экструдер и ванны водяного охлаждения. При этом контроль первичных параметров качества изоляции осуществляется обычно на сформированной изоляции, т.е. на выходе ванн охлаждения, длина которых составляет более 10 м. При этом в системах регулирования по ошибке контролируемого параметра величина транспортного запаздывания τ определяется по формуле:

$$\tau = \frac{L_B}{V}, \quad (1)$$

здесь L_B – длина ванны охлаждения до места установки датчиков;

V – скорость изготовления кабеля (изолирования).

В [1] показано, что максимальная частота передаваемого по кабелю электрического сигнала (верхняя частота рабочего диапазона кабеля) f_B определяет максимальную частоту взаимодействующих с ним пространственных неоднородностей первичных параметров кабеля g_{\max} и, соответственно, их минимальный пространственный период $L_{k\min}$, которые должны быть устранены системой регулирования. Для современных кабелей с верхней границей полосы пропускания 600 МГц $L_{k\min} = 0,165$ м.

В [2] описано осуществленное экспериментальное обследование процесса изо-

¹ Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 09-08-00297-а, 11-08-01171-а); АВЦП “Развитие научного потенциала высшей школы” (проект №2.1.2/4236) и ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 г.г.” (госконтракт № П231 от 23 июня 2009 г.)

Владимир Николаевич Митрошин – д.т.н., зав. кафедрой “Автоматика и управление в технических системах”.

лирования на линии ME-90 фирмы Maillefer, для чего с помощью датчика диаметра модели LG1010 фирмы Beta Instrument Company Limited была получена кривая нерегулярности диаметра изоляции кабельной жилы $\Delta D_{из}$ по её длине. Авторами сделано предположение, что имеющиеся высокочастотные периодические неоднородности диаметра накладываемой кабельной изоляции обусловлены периодическими пульсациями давления расплава в кабельной головке, вызываемыми вращающимся шнеком экструдера.

Так как в процессе производства производительность линии (скорость изолирования) может изменяться, то транспортное запаздывание является переменной величиной. Но, как известно, время регулирования систем с транспортным запаздыванием при использовании ПИД-регуляторов можно получить порядка $(4 \div 6)\tau$, что соответствует пространственным неоднородностям $(4 \div 6)L_B$ [3]. Следовательно, неоднородности контролируемых параметров с пространственным периодом менее четырехкратного расстояния от головки пресса до контролирующих датчиков (менее 40 м) не могут быть скорректированы системой управления.

$$L_{k \min} \geq 4L_B = 4V \cdot \tau. \quad (2)$$

Это ни в коей мере не соответствует требованиям обеспечения заданной полосы пропускания кабеля, как канала связи, рассчитанного на использование в требуемом частотном диапазоне передаваемых сигналов.

Для устранения подобных высокочастотных периодических неоднородностей диаметра изоляции неприменимы классические методы использования систем стабилизации диаметра по сигналу ошибки, измеряемой на выходе ванн охлаждения экструзионной линии, что обусловлено большим транспортным запаздыванием объекта управления. Необходимо использовать системы стабилизации давления расплава в кабельной головке в пределах одного оборота шнека экструдера.

Известно, что в случае цилиндрического червяка приращение давления на выходе червяка ($x_1 = l_d$) описывается выражением [4]:

$$\Delta P_d = \frac{B_z \mu_o}{R} \left(\frac{\pi D N}{h^{n+1}} \right)^{1/n} \left[\frac{l_d (\cos \varphi)^{1+1/n}}{\sin \varphi} + \beta (\sin \varphi)^{1+1/n} \cdot x_1 \right] (n+1)^{1/n}, \quad (3)$$

здесь B_z – безразмерный градиент давлений в продольном течении;

μ_o – коэффициент консистенции полимера;

N – обороты шнека;

D – диаметр шнека;

h – глубина канала шнека;

n – индекс течения полимера;

φ – угол захода червяка;

l_d – длина зоны дозирования;

$x_1; y_1; z_1$ – текущие координаты канала шнека: поперек, по высоте и по длине канала соответственно;

ϖ – ширина канала шнека;

β – отношение градиентов давлений, действующих в циркуляционном и продольном течениях соответственно;

b – температурный коэффициент вязкости;

$T(z_1); T_0$ – температуры полимера по каналу шнека и на входе в зону дозирования соответственно.

$$0 \leq x_1 \leq \varpi; \quad R(z_1) = \exp b [T(z_1) - T_0]; \quad R = \exp b [T(l_d) - T_0]. \quad (4)$$

Безразмерный градиент давлений в поступательном течении определяется из граничного условия: $v_z = V_z$ при $y = 1$.

Он равен [4]

$$B_z = \frac{1}{\left[(1 - y_0)^{n+1} - |y_0|^{n+1} \right]^{1/n}}. \quad (5)$$

Здесь v_z – продольная составляющая скорости движения пластмассы по оси z_1 ;
 V_z – продольная составляющая окружной скорости движения гребней винта шнека V_o ;
 $y = y_1/h$ – безразмерная координата сечения по глубине канала шнека;
 y_0 – безразмерная координата сечения по глубине канала шнека, где $\sigma_{zy} = 0$;
 σ_{zy} – распределение напряжений сдвига в нормальном сечении потока в поступательном течении.

Анализ формулы (3) позволяет сделать несколько выводов:

- Второе слагаемое в квадратных скобках является гармоническим сигналом, т.к. при вращении шнека с постоянной скоростью N в соответствии с (4) x_1 периодически изменяется от 0 до ϖ .
- Это приводит к появлению гармонических пульсаций давления расплава полимера на выходе зоны дозирования экструдера.
- При увеличении длины зоны дозирования l_d , т.е. при возрастании первого слагаемого в (3), уменьшается влияние пульсаций давления на выходе зоны дозирования на величину приращения давления на выходе червяка, и, соответственно, на изменение производительности шнека.
- Частота пульсаций давления расплава полимера в зоне дозирования однозначно определяется оборотами червяка (шнека) экструдера.
- Амплитуда пульсаций давления расплава может быть определена для конкретных режимов работы оборудования, его конструктивных параметров и свойств перерабатываемого полимера в соответствии с (3), но это сопряжено с “полномасштабным” численным расчетом экструдера: определением поля скоростей реального потока и температурного поля расплава полимера в зоне дозирования с учётом влияния предшествующих зон – питания и плавления, т.е. с учётом конкретных начальных условий.

В работе [5] реальный поток расплава полимера аппроксимируют пульсирующим потоком под давлением (6). Последний в соответствии с экспериментальными исследованиями характеризуется сравнительно низкой частотой, а также независимостью амплитуды и частоты синусоидальных колебаний от средней скорости сдвига, которая может принимать очень большие значения.

$$\frac{\partial P}{\partial z_1} = \left(\frac{\partial P}{\partial z_1} \right)_s \cdot \left(1 + \varepsilon \operatorname{Re} \left\{ e^{j\omega t} \right\} \right); \quad (6)$$

где $\left(\frac{\partial P}{\partial z_1} \right)_s$ – градиент давления расплава полимера в продольном течении для стационарного потока;

ε – относительная амплитуда колебаний градиента давления;
 Re – число Рейнольдса; ω – частота колебаний градиента давления;
 t – время.

Теоретические и экспериментальные исследования пульсирующего потока [6, 7] показали, что эффектом инерционности можно пренебречь, если выполняется условие $(h\omega/2\pi\bar{v}_z)Re < 0,1$. Такое условие всегда выполняется для полимерных расплавов при малом числе Рейнольдса ($Re < 10^{-2} \div 10^{-3}$), которое характерно для реальных условий течения. Здесь \bar{v}_z – средняя продольная составляющая скорости движения расплава полимера по оси z_1 .

В [5] предлагается измерять мгновенные значения давления массы на входе и вблизи выхода рассматриваемого участка канала. При измерении давления допускали, что влиянием нормальных напряжений, действующих на датчик давления, можно пренебречь, т.к. они существенно меньше, чем изотропное давление, а также потому, что их изменение во времени не пропорционально амплитуде колебаний давления. По измеренным максимальным и минимальным значениям градиента давления рассчитывают амплитуду колебаний

$$\varepsilon = \frac{\Delta P_{\max} - \Delta P_{\min}}{\Delta P_{\max} + \Delta P_{\min}}. \quad (7)$$

Для полиэтилена низкой плотности, наиболее широко использующегося в качестве изоляции проводных кабелей связи, найден пульсирующий модельный поток расплава полимера с учетом его вязко-эластичного поведения [5]. С помощью экспериментально определенных параметров пульсирующего потока расплава построен график пульсаций мгновенной объемной производительности экструдера (рис. 1).

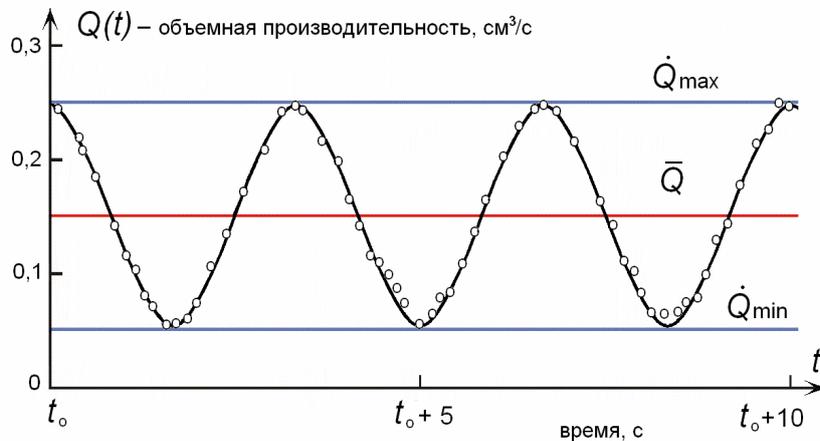


Рис. 1 Пульсации мгновенной объемной производительности экструдера, полученные в результате экспериментальных исследований течения расплава полимера в одночервячном экструдере (при $T_M = 443\text{K}$; $\varepsilon = 0,19$; $\omega = 0,84\text{c}^{-1}$; $(\dot{\gamma}_0)_{\text{ст}} = 45,12\text{c}^{-1}$)

При различных температурах проверена адекватность математического описания и температурная инвариантность полученных параметров. Установлено хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными результатами.

Здесь \bar{Q} – среднее значение объёмной производительности; T_M – температура расплава полимера; $(\dot{\gamma}_0)_{\text{ст}}$ – скорость сдвига у стенки канала шнека. Для эксперимен-

тальных исследований был использован полиэтилен с плотностью $\rho = 0,919 \div 0,920 \text{ г/см}^3$.

Таким образом, пульсирующий градиент давления расплава полимера в зоне дозирования экструдера, вызванный вращением шнека, обуславливает гармонические изменения мгновенной объемной производительности экструдера и, соответственно, периодические неоднородности диаметра изоляции кабельной заготовки. Поэтому данный параметр может рассматриваться в качестве возмущающего воздействия в системе стабилизации давления расплава полимера в зоне дозирования экструдера. Как показано выше, количественные параметры рассматриваемого возмущения могут быть легко определены экспериментальным путем.

В соответствии с этим синтез и анализ разрабатываемой системы стабилизации давления расплава полимера в зоне дозирования экструдера необходимо осуществлять с учетом возмущающего гармонического воздействия f по давлению с известными параметрами.

Функциональная схема подобной системы, содержащей низкочастотный контур стабилизации диаметра изоляции и высокочастотный контур стабилизации давления расплава полимера, представлена на рис.2.

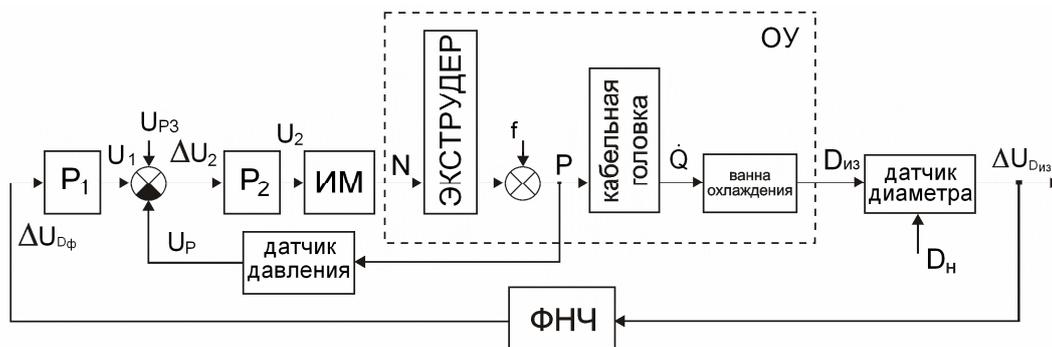


Рис. 2 Функциональная схема системы управления процессом наложения кабельной изоляции

На рис.2 P_1 и P_2 – регуляторы контуров регулирования диаметра и давления соответственно; U_{P3} – заданное значение давления расплава полимера; ИМ – исполнительный механизм; ОУ – объект управления; ФНЧ – низкочастотный фильтр; $D_{из}$ – диаметр изоляции; $D_н$ – номинальное значение регулируемого диаметра; P – давление расплава полимера; U_i – напряжения на выходах устройств.

Как отмечается в [8], объемная производительность экструдера прямо пропорциональна давлению расплава полимера на выходе зоны дозирования.

Передаточная функция экструдера W_3 , где выходом является объемная производительность, а входом – обороты шнека, представляет собой передаточную функцию аperiodического звена первого порядка [9,10].

$$W_3 = \frac{k}{1 + T_p s} \quad (8)$$

Коэффициент передачи и постоянная времени объекта легко определяются экспериментальным путем по его переходной функции для конкретных конструктивных характеристик экструдера, технологических режимов его работы и типоразмера

изготавливаемого кабеля и пригодны для использования только в окрестностях рабочей точки.

В [8] отмечается, что при использовании высокоскоростного привода шнека удалось компенсировать колебания давления примерно за 80 мс. При этом отклонение давления расплава при непрерывной эксплуатации экструзионной установки составляет лишь 0,3% от заданного значения давления.

Предлагаемая методика определения характеристик гармонических возмущающих воздействий в системе стабилизации давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера и синтеза системы с учётом реальных возмущений при автоматизации непрерывных технологических процессов изолирования проводных кабелей связи позволяет гарантировать обеспечение требуемого качества кабеля как канала связи с учетом его полосы пропускания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дорезюк Н.И.* Гармонический анализ периодических неоднородностей волнового сопротивления коаксиальных кабелей. – Электротехническая промышленность. Серия “Кабельная техника”, 1974, № 6, с. 18 – 22.
2. *Митрошин В.Н., Митрошин Ю.В.* Автоматизация процесса наложения изоляции при непрерывном производстве проводных кабелей связи // Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-2010). Материалы Международной научно-технической конференции (Самара, 17-21 мая 2010 г.). – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – С. 36 – 40.
3. *Гурецкий Х.* Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974.
4. *Торнер Р.В.* Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1977. – 464 с.
5. *Marinov S., Steller R.* Erfassung der Schmelzeströmung in Extrusionsdüsen bei pulsierendem Druckgradienten. – *Plaste und Kautschuk*, 1985, Bd. 32, № 9, s. 346 – 349.
6. *Edwards M.F., Nellist D.A., Wilkinson W.L.* *Chem. Engng. Sci.* 27, 1972, s. 235.
7. *Sundstrom M.F., Kaufman A.* *Ind. Engng. Chem. Proc.* 16, 1977, s. 320.
8. *Reiner T., Bohmann J.* Prozessorgeregeltes ummanteln elektrischer Leiter. – *Drahtwelt*, 1986, Jg. 72, № 5, s. 138 – 141.
9. *Laurich K., Muller G., Bluckler B., Wallau H.* Untersuchung einer Zweigroßenregelstrecke an einer kabelummantelungsanlage. – *Mess. – Steuern – Regeln*, 1979, 22, №1, s. 28 – 31.
10. *Chan D., Lee L.J.* Dynamic modeling of a single screw plasticating extruder. *ANTEC'84*, 1984, p. 77-80.

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2011 г.

UDC 681.5:621.315

CONTROL OF MELT POLYMER PRESSURE IN THE BATCHING ZONE OF THE SINGLE-SCREW EXTRUDER WITH PULSATING PRESSURE GRADIENT

V.N. Mitroshin

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

The method of determining the characteristics of the harmonic disturbing influences in the stabilization system of the polymer melt pressure in the batching zone of the single-screw extruder is proposed. Advices on the synthesis of automation system the process of insulation of wired communication cable with account of real perturbations to guarantee the provision of the required quality of the cable as a communication channel with desired to its bandwidth is given.

Keywords: cable manufacture, automation, melt pressure.

Vladimir N. Mitroshin - Doctor of Technical Sciences.