

# Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 62-50

## РОБАСТНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ И ПАССИВНОЙ АДАПТАЦИЕЙ

**В.Е. Вохрышев**

Самарский государственный технический университет  
443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vohr3@yandex.ru

*Рассмотрены динамические характеристики объектов с запаздыванием. Предложены робастные структуры и алгоритмы их управления с пассивной (сигнальной) адаптацией. Исследованы статические и динамические свойства робастных самонастраивающихся систем с большим запаздыванием с предложенными алгоритмами, обеспечивающие устранение статических ошибок при действии постоянных задающих и возмущающих воздействий без использования интегрирующих элементов в основном контуре системы. Показано, что системы обладают низкой чувствительностью к вариациям параметров объекта и возмущающим воздействиям.*

**Ключевые слова:** робастная система, самонастраивающийся алгоритм, чувствительность систем с запаздыванием.

Большой класс объектов автоматизации образуют технологические процессы и динамические объекты в нефтяной, кабельной, нефтехимической промышленности, тепло- и электроэнергетике, особенность которых заключается в их значительной инерционности и наличии в структуре и каналах передачи информации звеньев запаздывания, оказывающих в системах автоматического управления существенное отрицательное влияние на устойчивость и качество регулирования. Изменяющаяся динамика подобных объектов усугубляет проблему создания надежных и эффективных систем автоматического управления.

Известны работы по синтезу регуляторов, направленные на уменьшение влияния запаздывания на устойчивость и качество управления путем:

- 1) компенсации запаздывания (включением в обратную связь системы упредителей Смита и моделей управляемых объектов) [1, 2, 3];
- 2) применения специальных методов настройки управления [4];
- 3) синтеза систем автоматического регулирования в классе самонастраивающихся с активной адаптацией [5, 6].

Первые два способа, как показывает практика их исследования и примене-

ния, оказываются малоэффективными для управления объектами с изменяющейся динамикой и требуют модернизации стандартных регуляторов. Самонастраивающиеся системы оказываются достаточно сложными в технической реализации и настройке, не исключают наличия статических ошибок при действии сигнальных возмущений и недостаточно надежны в эксплуатации.

В связи с этим проблема синтеза простых и практически эффективных законов, алгоритмов и систем автоматического управления объектами с запаздыванием сохраняет свою актуальность.

Эффективность при этом определяется соотношением полезности результатов применения системы по назначению с затратами и потерями, обусловленными ее созданием и эксплуатацией.

Многие современные подходы к синтезу эффективного управления делают акцент на робастность систем – робастность устойчивости, робастность качества – в условиях изменения динамики объекта в ограниченном диапазоне.

В настоящей статье предлагаются и исследуются робастные структуры и алгоритмы самонастраивающихся систем с пассивной (сигнальной) адаптацией, предназначенные для управления объектами с большим запаздыванием и гарантирующие определенную совокупность инженерных требований к их качественным свойствам в переходном и установившемся режимах работы в условиях существенной неопределенности параметров объекта и среды.

Под «большим» в данном случае понимается время запаздывания, значительно превышающее максимальную постоянную времени объекта.

Передаточные функции объектов с запаздыванием обычно имеют вид

$$W_o(p) = W_1(p) e^{-p\tau}, \quad (1)$$

где  $W_1(p)$  – передаточная функция объекта без запаздывания;  $\tau$  – время запаздывания.

Математическое описание (1) получают во многих случаях по экспериментально полученной переходной характеристике объекта, выделяя в ней участок со временем запаздывания  $\tau$ , а передаточную функцию  $W_1(p)$  представляют в виде апериодического звена первого (реже второго) порядка

$$W_o(p) = \frac{k_o}{Tp + 1} e^{-p\tau}, \quad (2)$$

где  $k_o$  – коэффициент передачи объекта;

$T$  – его постоянная времени.

Уравнение (2), следовательно, лишь с той или иной степенью приближения отражает истинную динамику объекта.

Существуют объекты, в которых звено запаздывания выделяется как отдельный элемент (звено транспортного («чистого») запаздывания) [3]. Передаточная функция (2) в этом случае может иметь вид

$$W_o(p) = \frac{k_o}{Tp + 1} k_3 e^{-p\tau}, \quad (3)$$

где  $k_3$  – коэффициент передачи звена запаздывания.

## Частотные характеристики и устойчивость систем с запаздыванием

Частотные характеристики системы с запаздыванием определяются выражением

$$W_p(j\omega) = W_2(j\omega)e^{-j\omega\tau}, \quad (4)$$

где  $W_p(j\omega)$  – амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы.

Если

$$W_p(j\omega) = \frac{k_o \cdot k_1}{T \cdot j\omega + 1} e^{-j\omega\tau} = \frac{k}{T \cdot j\omega + 1} e^{-j\omega\tau}, \quad (5)$$

где  $k_1$  – коэффициент усиления пропорционального регулятора,  $k = k_o \cdot k_1$ , то тогда согласно критерию устойчивости Найквиста для устойчивых в замкнутом состоянии систем годограф (5) не должен охватывать точку  $-1, j0$ . Значения  $\tau = \tau_0$  и  $\omega = \omega_\pi$ , при которых  $W_p(j\omega)$  проходит через точку  $-1, j0$ , называются предельными [7] и определяются из уравнения

$$W_1(j\omega_\pi)e^{-j\tau_0\omega_\pi} = -1, \quad (6)$$

которое эквивалентно двум уравнениям:

$$|W_1(j\omega_\pi)| = -1; \quad (7)$$

$$\arg W_p(j\omega_\pi) = \arg W_1(j\omega_\pi) - \omega_\pi\tau_0 = -\pi(2m+1), \quad m = 1, 2, \dots$$

Отсюда предельное (минимальное) время запаздывания можно определить из условия

$$\tau_0 = \frac{\pi - \theta}{\omega_\pi},$$

где  $\theta = -\arg W_1(j\omega_\pi) = \arctg(\omega_\pi T)$ .

Уравнение (7) для случая системы (5) имеет вид

$$k^2 = 1 + \omega_\pi^2 T^2,$$

откуда  $\omega_\pi$  и  $\tau_0$  соответственно равны

$$\omega_\pi^2 = \frac{k^2 - 1}{T^2};$$
$$\tau_0 = \frac{\pi - \arctg(\omega_\pi T)}{\omega_\pi}.$$

Если годограф  $W_1(j\omega)$  лежит в окружности единичного радиуса ( $k < 1$ ), то система устойчива при любом значении запаздывания. Таким образом, изменением или заданием коэффициента усиления системы можно обеспечить устойчивость системы при изменении параметров объекта.

Понятно, что в замкнутой системе (5) всегда будет присутствовать статическая ошибка, величина которой при постоянном входном воздействии и отсутствии сигнальных возмущений не превышает значения

$$\varepsilon(t) = \frac{x_0}{1+k},$$

где  $x_0$  – задающее воздействие (уставка).

На рис. 1, 2 приведены предлагаемые структуры самонастраивающихся систем управления объектами (2) и (3) соответственно.

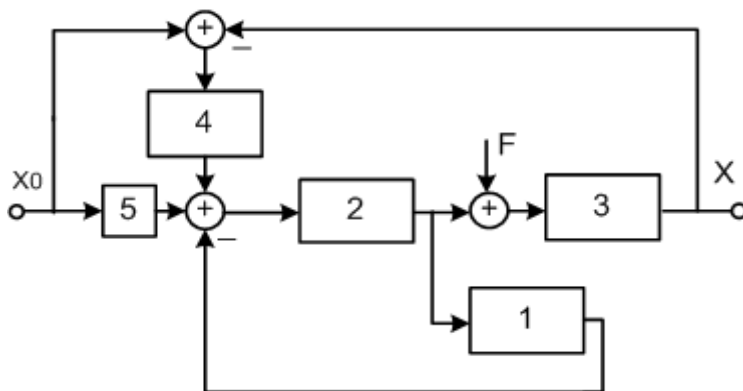


Рис. 1. Структура самонастраивающейся системы управления объектом (2):

1 – модель линейной части объекта управления (2) без запаздывания  $W_{1м}(p) = \frac{k_o}{Tp+1}$ ;

2 – управляющее устройство  $W(p)=k_1$ ; 3 – объект  $W_1(p) = \frac{k_o}{Tp+1} e^{-\rho\tau}$ ; 4 – исполни-

тельный элемент  $W_2(p) = \frac{k_4}{p}$ ; 5 – масштабирующий множитель  $k_2 \leq 1$ ; X – регулиру-

емая координата;  $X_0$  – задающее воздействие; F – возмущение

Здесь в прямом контуре управления используется стандартный пропорциональный регулятор (П-регулятор) с передаточной функцией  $W(p) = k_1$ , а статическая ошибка, неизбежно возникающая в системе при действии задающего и возмущающих сигнальных воздействий, устраняется путем автоматического масштабирования величины  $x_0$  специальным исполнительным устройством [8].

В каждой из приведенных структур образовано два контура управления: первый – исполнительным элементом 4, второй – П-регулятором и объектом с передаточной функцией  $W_1(p)$  (рис. 2) или его моделью (см. рис. 1). Исполнительное устройство (4), выполненное в виде интегрирующего звена с передаточной функцией  $W_2(p) = \frac{k_4}{p}$  и включенное в контур самонастройки, осуществляет

автоматическое изменение задающего воздействия  $x_0$  в функции ошибки. Это позволяет при соответствующем выборе коэффициентов  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_4$ , обеспечивающих сходимость процессов в системе во всем ограниченном диапазоне изменения параметров объекта и среды, устранять статические ошибки в системах стабилизации при действии как задающих, так и возмущающих параметрических и сигнальных воздействий (изменяющихся в определенном диапазоне) без интегрирующих звеньев в прямой цепи управления.

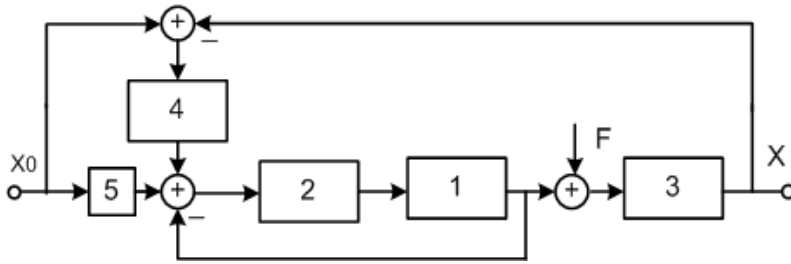


Рис. 2. Структура самонастраивающейся системы управления объектом (3):

1 – линейная часть объекта управления (2) без запаздывания ( $W_1(p) = \frac{k_o}{Tp+1}$ ); 2 – управляющее устройство  $W(p) = k_1$ ; 3 – звено запаздывания ( $k_3 e^{-p\tau}$ ); 4 – исполнительный элемент  $W_2(p) = \frac{k_4}{p}$ ; 5 – масштабирующий множитель  $k_2 \leq 1$ ; X – регулируемая координата;  $X_0$  – задающее воздействие; F – возмущение

Передаточные функции структур рис. 1 и 2 при  $W_{1M}(p) = W_1(p)$  совпадают и имеют вид при  $F=0$

$$W_{zc}(p) = \frac{(k_2 + \frac{k_4}{p})k_1 W_o(p)}{1 + k_1 W_1(p)(1 + \frac{k_4 e^{-p\epsilon}}{p})}. \quad (8)$$

Можно в операторной форме записать дифференциальное уравнение замкнутой системы и показать, используя теорему о предельном переходе, что  $x(t) = x_0$  в установившемся режиме при  $x_0 = Const$  и  $f = Const$ :

$$x(t)|_{t \rightarrow \infty} = \left[ \frac{(k_2 + \frac{k_4}{p})k_1 W_o(p)x_0}{1 + k_1 W_1(p)(1 + \frac{k_4 e^{-p\epsilon}}{p})} \right]_{p \rightarrow 0} - \left[ \frac{W_o(p)f}{1 + k_1 W_1(p)(1 + \frac{k_4 e^{-p\epsilon}}{p})} \right]_{p \rightarrow 0} = x_0.$$

При изменении параметров в качестве меры робастности используют дифференциальную чувствительность системы, под которой понимается отношение изменения ее передаточной функции к изменениям передаточной функции (или параметров) объекта управления при условии их малости [3]. Чувствительность замкнутой системы (4) к изменению передаточной функции  $W_o(p)$  будет равна

$$S_{W_o}^{W_{zc}} = \frac{\partial W_{zc}}{\partial W_o} \cdot \frac{W_o}{W_{zc}} = \frac{1 + k_1 W_1(p)}{1 + k_1 W_1(p)(1 + \frac{k_4 e^{-p\epsilon}}{p})} \approx \frac{1}{1 + \frac{k_4 e^{-p\tau}}{p}}.$$

Отсюда видно, что чувствительность замкнутой системы будет изменяться при изменении параметров объекта и зависит главным образом от величины запаздывания и коэффициента исполнительного устройства.

На рис. 3 приведены некоторые результаты исследований методом компьютерного моделирования системы рис. 2. Здесь представлены переходные процес-

сы в замкнутой системе (4) с объектом (3) при оптимальных настройках регуляторов в основном контуре и контуре самонастройки (рис. 3а) ( $k_o=1,6$ ,  $T=0,5$  сек,  $\tau=2$  сек,  $k_1=1,5$ ,  $k_2=0,1$ ,  $k_4=0,15$ ) и в той же системе и тех же настройках управления, но с увеличенными параметрами  $k_o$  и  $\tau$  объекта (3) в два раза (рис. 3б).

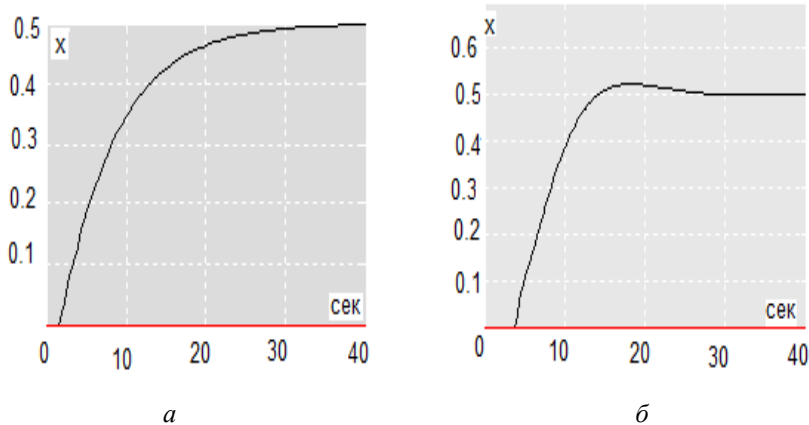


Рис. 3. Переходные процессы в системе (4) с запаздыванием

Из сравнения рисунков видно, что система не теряет устойчивости, в системе отсутствует статическая ошибка и перерегулирование не превышает 5 %. Как показывают исследования, при дальнейшем увеличении параметров объекта качество управления ухудшается и для обеспечения устойчивости приходится уменьшать коэффициент усиления в основном контуре.

### Выводы

1. Предложены и исследованы робастные самонастраивающиеся системы автоматического управления динамическими объектами с запаздыванием и пассивной (сигнальной) адаптацией, гарантирующие определенную совокупность инженерных требований к их качественным свойствам в переходном и установившемся режимах работы в ограниченном диапазоне изменения параметров объекта и среды.

2. Аналитическими исследованиями и исследованиями методом компьютерного моделирования показано, что системы обладают низкой чувствительностью к вариациям параметров объекта и возмущающим сигнальным воздействиям.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смит О. Дж. Автоматическое регулирование. – М.: Физматгиз, 1962. – 255 с.
2. Плутес В.С. К вопросу построения оптимальных САР объектов с чистым запаздыванием / Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1968-1969 гг. Секция автоматизации, вычислительной и измерительной техники. Подсекция автоматического управления. – М.: МЭИ, 1970. – С. 62-73.
3. Миркин Е.Л., Шаршеналиев Ж.Ш. Синтез адаптивных систем управления с вспомогательной моделью с запаздыванием в управлении // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 11. – С. 159-171.
4. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Пер. с англ. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
5. Еремин Е.Л., Еремин И.Е. Адаптивная система для объекта с запаздыванием по управлению в схеме с динамическим корректором и эталонным упредителем // Информатика и системы

- управления. – 2013. – № 4 (38). – С. 111-120.
6. А.с. № 1177801 СССР. Устройство для регулирования диаметра изоляции кабеля / В.Е. Вохрышев. – Оpubл. 1985. – Бюл. № 33.
  7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768 с.
  8. Пат. № 250584. Российская Федерация. Самонастраивающееся устройство для устранения статической ошибки в автоматических системах стабилизации динамических объектов / В.Е. Вохрышев. – Оpubл. 2014. Бюл. № 3.

*Статья поступила в редакцию 27 января 2014 г.*

## **ROBUST SYSTEMS OF AUTOMATIC DIRECTION BY DYNAMIC OBJECTS WITH TIME RELAY AND PASSIVE ADAPTATION**

***V.E. Vokryshev***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*Static and dynamic characteristics of the objects with delays in time are analyzed in the paper. Self-directing robust systems and algorithms of their direction with passive (signal) adaptation are provided. The static and dynamic characteristics of robust self-adapting systems with long time delay are studied. The system of algorithms, providing for the elimination of static mistakes involving constant beginning and revolting influences without use of integrated components in a basic contour of the system is suggested. It's shown with the help of analytical procedures and by the method of computer modeling that the systems have a property of low sensibility to variations of the object's parameters and revolting signal influences. At that the system remains stable and guarantees the necessary complex of system's quality demands.*

***Keywords:*** Robust system with time relay, self-orienting algorithm.

УДК 681.536.57

## АНАЛИЗ АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА ЗОН ЭКСТРУДЕРА АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

*А.Г. Михеев*

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

*Приведен анализ алгоритма преобразования полимера при его наложении на кабельные изделия в экструдере. Определены требования к технологической настройке режимов обогрева отдельных зон рабочего цилиндра. Показано, что в первой зоне температура не должна превышать температуры плавления полиэтилена, во второй зоне она повышается для создания гетерогенного расплава полимера и лишь в третьей зоне окончательно формируется рабочая масса полимера для последующего наложения ее на токоведущую жилу. Дано обоснование требований непосредственно к технологическому режиму работы головки экструдера. Давление полимера в ней принято за основное воздействие при управлении процессом изолирования кабельных изделий. Все предложенные алгоритмы доведены до конкретных рекомендаций при их технической реализации с использованием локальных подсистем АСУ ТП.*

**Ключевые слова:** *экструдер, зоны обогрева рабочего цилиндра, давление полимера в головке экструдера, регулирование диаметра изоляции, локальные регуляторы температуры.*

В современных системах проводной связи широко используют различные кабели, основным видом изоляции в которых является полиэтилен. Технологический процесс наложения этой изоляции на отдельные проводники или элементы конструкции кабеля реализуется на автоматических линиях с непрерывным режимом работы. Одним из наиболее ответственных узлов таких автоматических линий является экструдер. Его основное назначение связано с непрерывным процессом наложения полиэтиленовой изоляции на элементы конструкции кабеля. Особую роль данная операция играет при наложении изоляции на первичный элемент кабеля в виде токоведущей жилы. Сам процесс наложения реализуется в головке экструдера, куда поступает заготовка проводника от отдатчика или с выхода системы отжига. Скорость изолирования определяет производительность всей линии. Поэтому роль экструдера в общей работе линии трудно переоценить. Известны различные варианты конструкции современных экструдеров, которые классифицируются по способу подачи полиэтилена в головку экструдера. Различают варианты использования для этих целей шнека с винтовой нарезкой, дисков особой формы и комбинированный вариант, который их объединяет, обеспечивая как хорошее смешение компонентов смеси, так и необходимое ее давление в головке экструдера.

В кабельной промышленности [1] применяют в основном первый вариант шнекового экструдера, который более известен как червячный пресс. В основу конструкции этого пресса положен шнек, имеющий на своей боковой поверхно-

---

*Александр Григорьевич Михеев (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».*



сти винтовую канавку или нарезку. Этот шнек помещается в обогреваемый цилиндр; в зависимости от природы полимера и технологии его переработки он имеет различный профиль нарезки по своей длине. Объемный расход полимера в таком экструдере определяется скоростью вращения его шнека, поэтому он снабжен индивидуальным приводом с возможностью регулирования скорости по информации о функционировании всей линии в целом. Обычно ограничиваются контролем скорости работы линии и значением диаметра жилы по ее внешней изоляции. Общее уравнение баланса изолирующей массы полимера имеет сравнительно простой вид:

$$\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot V_{из} \cdot \Delta t = K \cdot n_{эк} \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр жилы по изоляции;  
 $d$  – диаметр медной проволоки;  
 $V_{из}$  – линейная скорость работы линии;  
 $n_{эк}$  – скорость вращения шнека экструдера;  
 $K$  – комплексный размерный коэффициент преобразования вращения шнека в производительность экструдера по полиэтилену;  
 $\Delta t$  – произвольный отрезок времени на интервале стационарности процесса наложения полиэтиленовой изоляции.

Вполне очевидно, что любое нарушение этого баланса рабочей среды можно классифицировать как действующее возмущение для зоны наложения изоляции. В левой части уравнения (1) к таким возмущениям следует отнести изменение скорости изолирования линии  $V_{из}$  и нестабильность диаметра медной проволоки. Если последнюю из них на первом этапе можно признать несущественной, то параметр  $V_{из}$  следует считать основным возмущением и принять меры по устранению его влияния на общий процесс наложения изоляции. Более сложен процесс оценки функционирования работы экструдера как основного технологического звена зоны наложения изоляции. В правой части уравнения (1) приведена скорость вращения шнека экструдера ( $n_{эк}$ ) как основная технологическая величина, с которой жестко связана производительность экструдера по полиэтилену. В реальных условиях эта связь зависит и от технологических режимов работы экструдера, который по своей длине в направлении движения полиэтилена имеет три зоны. Они, конечно, имеют свои особенности и обладают свойством взаимного влияния на общий процесс экструзии. Так, в первой зоне происходит загрузка полиэтилена в виде гранул. Попав в эту зону, он захватывается винтовой нарезкой и перемещается вдоль оси шнека по направлению второй и третьей зоны. Именно поэтому нарезка шнека в этой зоне более глубокая. Кроме того, процесс движения полимера возможен только в том случае, если его трение о стенки цилиндра будет создавать большее усилие, чем трение этого же полимера о поверхность шнека. С этой целью на внешней поверхности цилиндра первой зоны расположены нагреватели, а сам шнек делают полым внутри для его охлаждения.

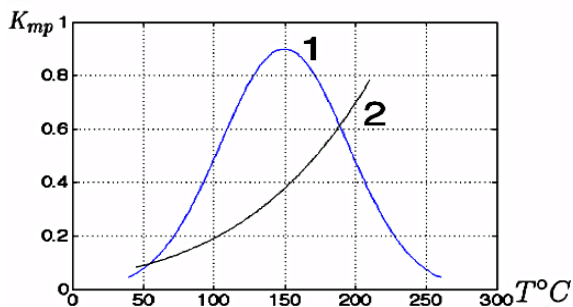
Качественное влияние температуры на коэффициент трения полимера о поверхность цилиндра показано на рисунке зависимостью 1.

Простой анализ общего характера приведенной зависимости показывает, что коэффициент трения возрастает до момента, когда начинается плавление полимера, т. е. до точки экстремума порядка 150 °С (для полиэтилена низкой плотности этот уровень температур составит (105÷110) °С). С повышением температуры происходит размягчение полимера, он становится более пластичным и заполняет весь объем канавки шнека, формируя плотную пробку в межвитковом пространстве шнека. Желательно, чтобы процесс формирования этой пробки при-

шелся на границу между первой и второй зонами. Тогда общая производительность экструдера полиэтилену определится выражением [2]

$$Q = \beta \alpha \rho \cdot n_{\text{эк}},$$

где  $\rho$  – объемная плотность полимера;  $\beta$  – объем нарезки одного витка на внешней поверхности шнека;  $\alpha$  – эквивалентный коэффициент заполнения рабочей зоны шнека (0,15÷0,50);  $n_{\text{эк}}$  – скорость вращения шнека экструдера.



Зависимость коэффициента трения от температуры полимера:  
1 – полиэтилен высокой плотности; 2 – поливинилхлоридный пластикат

Во второй зоне плавление полимера продолжается, он становится более пластичным. Глубина нарезки спиральных канавок обычно уменьшается, что приводит к увеличению продольного давления передаваемого уже через жидкую фазу полимера. Состав полимера при этом доводится до однородной композиции, и в гетерогенном состоянии (расплав с частичками твердого полиэтилена) он попадает в 3-ю зону, которая играет роль зоны дозирования. На ее выходе расположена сетка фильтра и головка экструдера, которая имеет дорн и матрицу, где и происходит наложение изоляции. При их отсутствии, когда речь идет о свободном выходе полимера из зоны обогрева, мы имели бы только основной поток этого полимера с минимальным уровнем его давления на выходе из головки экструдера, близким к атмосферному. Если же учесть влияние головки экструдера, то она создает гидравлическое сопротивление, а следовательно, внутри третьей зоны происходит повышение давления полимера. Результирующий поток полиэтилена характеризует его расход в зоне наложения изоляции:

$$Q = \lambda \cdot n_{\text{эк}} - (\varphi + \nu) \cdot P / \eta, \quad (2)$$

где  $\lambda$ ,  $\varphi$ ,  $\nu$  – постоянные конструктивные коэффициенты, которые характеризуют соотношение между основным потоком, величиной протivotока и утечкой расплава полимера соответственно.

Количественная оценка данных коэффициентов связана с геометрическими размерами шнека и экструдера, а их размерность соответствует выбранной системе единиц. Если считать данные коэффициенты фиксированными, то при неизменной скорости вращения шнека ( $n_{\text{эк}}$ ) можно считать, что результирующий расход полиэтилена, определяемый выражением (2), будет пропорционален давлению этого полиэтилена в головке экструдера ( $P$ ). Стабильная работа экструдера связана с понижением чувствительности расхода к давлению в головке экструдера. Она определяется таким известным геометрическим параметром экструдера, как отношение длины шнека  $L$  к его диаметру  $D$ . В кабельной промышленности наиболее ходовые конструкции реализуют это отношение в пределах (20÷25). Независимо от конкретного конструктивного решения экструдера из его цилиндра полимер попадает уже в головку экструдера, где и происходит наложе-

ние изоляции на токоведущую жилу, проходящую через дорн внутри матрицы этой головки. Это завершающая операция, и на формующей части головки экструдера при продавливании через нее полимера действует перепад давлений  $\Delta P$ , который равен разности давлений между внутренней частью головки экструдера и внешней средой:  $\Delta P = P - P_{\text{вых}}$ . Этот перепад и будет определять интересующий нас расход полимера в общем балансе рабочей среды (1). Его количественная оценка определяется выражением

$$Q = K_0 \cdot \Delta P / \eta, \quad (3)$$

где  $\eta$  – вязкость расплава полимера;

$K_0$  – размерный коэффициент пропорциональности, характеризующий сопротивление канала головки экструдера процессу движения через него полимера.

Проведенный анализ алгоритма функционирования работы экструдера позволяет наметить и общий принцип управления его работой в составе автоматических линий кабельных предприятий.

Как известно, управление технологическим процессом всегда предполагает наличие критерия, который позволяет дать оценку качества функционирования основного технологического оборудования этого процесса. В нашем случае будем ориентироваться на геометрические размеры нанесенной изоляции, т. е. на величину диаметра жилы по изоляции. При этом не следует забывать и о целом ряде технологических факторов, которые приводят к нарушению внешней поверхности самой изоляции, ее геометрии, механических свойств, надежности и долговечности. Уменьшение дисперсии по этим показателям требует контроля температурного режима не только зон обогрева цилиндра экструдера, но и его головки, где расположены дорн и матрица, формирующие изоляцию на элементах конструкции кабельных изделий. С учетом вышеназванных обстоятельств и с опорой на проведенный анализ функционирования системы обогрева экструдера можно сформулировать требования, которые предъявляются к общему алгоритму управления всем технологическим процессом этого звена.

1. Температурный режим обогрева зон экструдера при его фиксированном значении ориентирован на постоянную скорость изолирования. Следовательно, при изменении этой скорости по различным причинам, в том числе и по чисто организационным, этот режим должен быть изменен.

2. Температурный режим первой зоны не должен доводить полимер до критического состояния начала его расплава, т. е. до температуры порядка  $(105 \div 150)^\circ\text{C}$  в зависимости от марки полиэтилена (подбирается опытным путем на конкретном виде технологического оборудования).

3. Во второй зоне температура повышается до уровня, при котором полный расплав полимера должен происходить за время прохождения им первых  $2/3$  общей длины этой зоны.

4. Температура третьей зоны решает задачу оптимальной фильтрации полимера и его калибровки на выходе из зоны наложения.

5. Конечное значение диаметра жилы по изоляции определяется давлением расплава полимера в головке экструдера и его температурой, которые подлежат контролю и коррекции в ходе технологического процесса.

6. Для уменьшения возмущений в зоне наложения изоляции скорость вращения шнека должна быть синхронизирована со скоростью работы всей линии и величиной давления в головке экструдера.

7. Со скоростью вращения шнека, в свою очередь, должна быть увязана тем-

пература зон обогрева экструдера, т. е. она играет для них роль входного или задающего сигнала.

Таким образом, работа экструдера моделируется целой гаммой взаимосвязанных технологических операций, и управление их ходом требует детальной предварительной проработки всех возможных технологических режимов на реальном оборудовании с использованием соответствующих марок полимера и его наполнителей. Реализовать полученные рекомендации по ведению общего технологического процесса изолирования в рамках конкретного экструдера можно на базе системы АСУ ТП с участием локальных подсистем управления температурой зон обогрева цилиндра и головки этого экструдера. Работа подсистем должна быть увязана с величиной скорости работы всей линии через специальный узел формирования задающих сигналов. С помощью этого узла устанавливается уровень температуры отдельных зон обогрева экструдера и уровень скорости вращения для системы стабилизации скорости его привода. Кроме того, в работе привода шнека экструдера необходимо предусмотреть возможность коррекции его скорости вращения по величине давления полимера в головке этого экструдера и по конечному значению диаметра изоляции токоведущих жил уже на выходе из зоны наложения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бульхин А.К., Кидяев В.Ф., Кижяев С.А. Электропривод и автоматизация волочильного оборудования. – Самара, 2002. – 482 с.
2. Производство электрических кабелей и проводов с резиновой и пластмассовой изоляцией / Л.С. Лахман, Н.Д. Троцкий, О.Ш. Бабицкий, И.Ш. Берин. – М.: Высшая школа, 1972 г.

*Статья поступила в редакцию 15 января 2014 г.*

## ANALYSIS OF OPERATION ALGORITHM FOR AUTOMATIC LINES EXTRUSION ZONE HEATING SYSTEM

**A.G. Mikheev**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The analysis of polymer transformation algorithm when applied to cable products in extruder is provided. The requirements for the technological mode setting individual heating zones of the working cylinder are defined. It is shown that in the first zone, its temperature must not exceed the melting temperature of polyethylene, and in the second area temperature is increased to create a heterogeneous polymer melt, and only in the third working area polymer mass is finally formed for subsequent blending it to a conductor. The substantiation requirements directly to the technological mode of the extruder's head work are given. Polymer pressure in it is taken as the main influence in the management process of isolation in cable products. All of the suggested algorithms are brought to certain recommendations for their technical implementation using the local APCS subsystems.*

**Keywords:** *extruder, main cylinder heating zone, polymer pressure in extruder orifice, insulation diameter adjustment, local temperature regulators.*

---

Alexander G. Mikheev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

УДК 004.896

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

*Д.А. Нечаев, С.П. Орлов*

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

*Рассматривается задача проектирования технологического оборудования для систем промышленного водоснабжения. Объектами исследования являются водозаборы и системы водоподготовки, обеспечивающие водой технологические процессы множества предприятий и производств, которые расположены в локальном районе региона. Описано использование интеллектуальной системы поддержки принятия решений по технологиям водоподготовки. В результате работы такой системы формируется набор альтернативных технологических схем, которые содержат множество аппаратов различного типа. Сформулирована задача оптимального выбора состава технологического оборудования для полученных технологических схем. Это задача дискретного программирования с булевыми переменными. Ограничения задачи учитывают допуски на значения качества воды, энергопотребление и другие технологические параметры. Приведены примеры использования предлагаемой методики для нескольких промышленных систем водоснабжения.*

**Ключевые слова:** *системы поддержки принятия решений, оптимизация, дискретное программирование, водоснабжение промышленных предприятий, технологии водоподготовки.*

### **Введение**

Развитие промышленного производства связано с увеличением объема потребляемой технологической воды и повышением требований к ее качеству. В таком промышленном регионе, как Самарская область, существует задача рационального использования подземных и поверхностных источников одновременно для промышленного водоснабжения и обеспечения населения водой. Для управления региональной программой водоснабжения была разработана интеллектуальная система поддержки принятия решений по технологиям водоподготовки (ИСППР ТВ) [1, 2, 3]. Эта система на основе данных о параметрах воды в водозаборе и требуемых показателей качества воды для промышленного производства генерирует несколько альтернативных вариантов технологических схем водоподготовки и водоочистки. Полученные решения анализируются с учетом ограничений на ресурсы и существующую номенклатуру оборудования. В работе [4] сформулирована задача выбора технологической схемы для хозяйственно-бытового водоснабжения. В настоящей статье предлагается постановка и решение задачи оптимального выбора оборудования для систем промышленного водоснабжения.

---

*Дмитрий Александрович Нечаев, аспирант.*

*Сергей Павлович Орлов (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Вычислительная техника».*

## Постановка задачи

Интеллектуальная система поддержки принятия решений ИСППР ТВ содержит базы знаний «Поверхностные воды» и «Подземные воды», а также базы данных по оборудованию и готовым технологическим схемам водоподготовки [5, 6]. Для каждой базы знаний создан сценарий логического вывода или база фактов на основе классификатора технологий НИИ ВОДГЕО, г. Москва [7]. Проведено заполнение базы правил в соответствии с синтаксисом правил продукционной модели и сформирован граф логического вывода.

Подсистемы «Поверхностные воды» и «Подземные воды» содержат правила, описывающие:

- классы поверхностных и подземных источников водоснабжения;
- подклассы поверхностных источников по антропогенному загрязнению;
- классификацию основных технологий водоподготовки для промышленных производственных процессов предприятий Самарской области с учетом антропогенных и природных загрязнений;
- технологические схемы и оборудование очистки подземных и поверхностных вод от загрязнений по классам для промышленного водоснабжения;
- классификации примесей в воде Самарского региона.

В статье выполнена постановка задачи оптимального выбора технологического оборудования системы водоснабжения, которая основывается на множестве альтернативных технологических схем, вырабатываемых ИСППР ТВ.

Для системы промышленного водоснабжения с помощью ИСППР ТВ генерируется  $J$  вариантов технологических решений. Технологическая схема  $S_j = (Q_j, V_j)$  представляет собой совокупность  $Q_j$  аппаратов выбранных типов и вектор  $V_j$  показателей качества воды для технологических процессов промышленного производства, который обеспечивается данным вариантом  $S_j$ .

При этом набор используемых типов аппаратов есть  $Q_j = \{q_m\}$ ,  $m \in I_j^{\text{ТА}} \subseteq I_{\text{ТА}}$ , где  $I_{\text{ТА}}$  – индексное множество номеров всех типов аппаратов, рассматриваемых при проектировании данной системы промышленного водоснабжения,  $I_j^{\text{ТА}}$  – индексное подмножество, содержащее номера выбранных типов аппаратов для технологической схемы  $S_j$ .

Тип аппарата  $q_r$  включает набор из  $M_r$  конкретных моделей с векторами параметров  $(d_{r,M_r,1}, \dots, d_{r,M_r,K_{r,M_r}})$ , где  $K_{r,M_r}$  – число параметров модели аппарата. Связь переменных и индексов для технологических схем, аппаратов и их параметров определяется композицией двудольных графов (см. рисунок).

Целевая функция – стоимость проектирования, строительства и эксплуатации системы промышленного водоснабжения:

$$C_P = \min \left\{ \sum_{m \in I_j^{\text{ТА}}} \sum_n (C_{jmn}^D + C_{jmn}^W + C_{jmn}^Э) x_{jmn} + C_j^{\text{П}} + C_j^{\text{H}} \right\}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (1)$$

где булева переменная оптимизации:

$$x_{jmn} = \begin{cases} 1 - \text{если в } j\text{-й технологической схеме для} \\ m\text{-го аппарата выбрана } n\text{-я модель аппарата;} \\ 0 - \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (2)$$

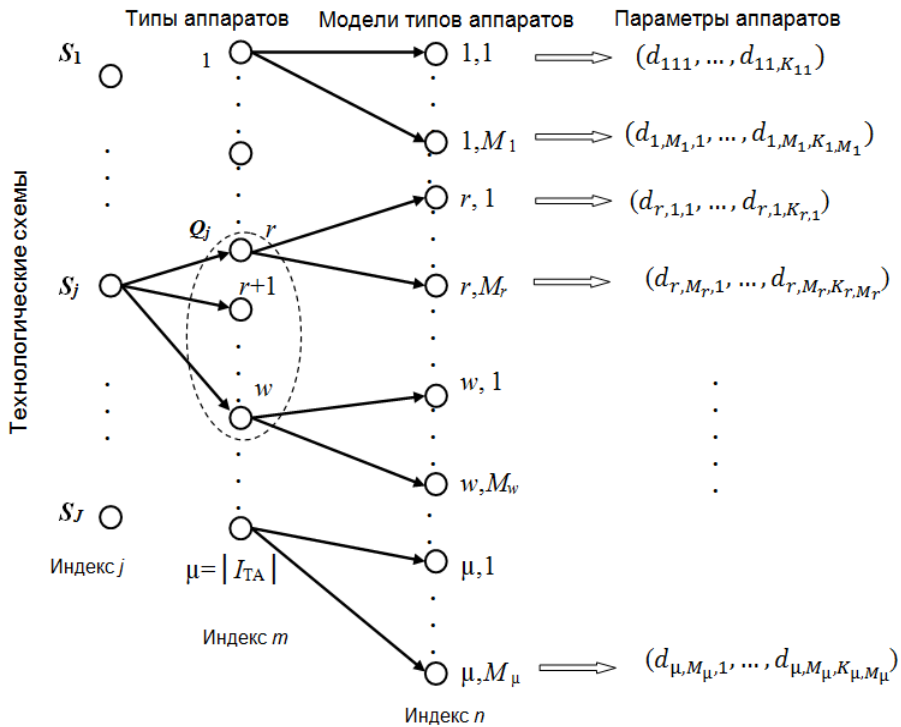
$C_{jmn}^D$  – стоимость  $n$ -й модели оборудования  $m$ -го типа в  $j$ -м варианте;

$C_{jmn}^W$  – удельная стоимость потребляемой оборудованием электроэнергии;

$C_{jmn}^Э$  – удельные эксплуатационные расходы на тип оборудования;

$C_j^П$  – стоимость технологического подключения электрической мощности для технологической схемы  $S_j$ ;

$C_j^H$  – стоимость отведения земельных участков или производственной площади под систему водоснабжения в  $j$ -м варианте.



Графовая модель структуры данных задачи оптимизации

Ограничения для задачи имеют вид:

$$1. \sum_{n=1}^{M_r} x_{jmn} = 1, \quad m \in I_j^{TA}, \quad j = \overline{1, J} \quad (3)$$

– условие единственности выбора моделей аппаратов для каждого типа оборудования.

$$2. V_j \leq V_j^{\text{доп}}, \quad j = \overline{1, J} \quad (4)$$

– параметры воды на выходе системы  $S_j$  должны отвечать нормам СанПиН либо требованиям технологического процесса выпуска продукции.

$$3. d_{mnk} x_{jmn} \leq d_{mnk}^{\text{доп}}, \quad k = \overline{1, K_{mn}}, \quad \forall m, n \quad (5)$$

– соответствие параметров оборудования заданным границам,  $K_{mn}$  – число параметров  $n$ -й модели оборудования  $m$ -го типа аппарата  $j$ -го варианта системы водоснабжения.

Задача (1) – (2) с ограничениями (3) – (5) относится к классу задач дискретного программирования, и для небольшой размерности решение может быть найдено полным перебором. Для реальной целевой региональной программы характерны значения  $J = 3 - 10$ ,  $|I_{\text{ТА}}| = 10 - 50$ ,  $K_{mn} = 5 - 10$ . В этом случае используется метод ветвей и границ [8].

### Использование методики при проектировании систем водоснабжения

В результате работы ИСППР ТВ формируется технологическая схема, которая показывает, какие используются типы аппаратов водоочистки и в какой последовательности они соединяются. Табл. 1 содержит обозначения типов аппаратов. В табл. 2 приведены примеры оптимизации ряда систем водоснабжения, выполненной совместно с НПО «Фильтр», г. Тольятти.

Таблица 1

Условные обозначения типов аппаратов для очистки воды

Н	Насос-автомат, насосная станция	Аз	Фильтрующая колонна с активированным углем
Мк	Фильтр очистки от механических примесей с картриджом	С	УФ-стерилизатор
Мз	Фильтр очистки от механических примесей с фильтрующей загрузкой	Д	Обратный осмос, деминерализатор с нерегенерируемой смолой
О	Обезжелезиватель безреагентный	Е	Накопительная емкость
У	Умягчитель натриево-катионитовый с регенерацией	Р	Комплекс пропорционального дозирования реагентов
Ак	Фильтр картриджного типа с активированным углем	–	

В табл. 1 обозначены параметры воды в водозаборе: 1 – жесткость, 2 – железо, 3 – марганец, 4 – минерализация.

Для каждого промышленного предприятия была сгенерирована технологическая схема, для которой решалась задача оптимизации выбора конкретных моделей аппаратов из базы данных оборудования. База данных составлена по каталогам фирм – производителей оборудования водоподготовки и водоочистки.



## Примеры технологических схем промышленного водоснабжения

Объект	Технологическая схема, полученная из ИСППР ТВ	Тип параметра воды				Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Стоимость оборудования		Удельная площадь на 1 м <sup>3</sup> /(чхм <sup>2</sup> )
		1	2	3	4		Тыс. руб.	На 1 м <sup>3</sup> /ч	
Сызранский автоагрегатный завод	Н-МкУС	+	+	+	+	0,8	92,19	115,24	3,8
PCY-1	Н-МкМЗУАкС	+	+	-	-	1,0	198,2	198,2	7,0
GM-АвтоВАЗ, цех сварки	Н-МкУР	+	+	-	-	3,0	344,1	114,7	2,0
ЗАО «Росскат»	Н-МкУ	+	+	-	-	5,5	506,1	92,0	1,1
ЖБК «Тольяттинский»	Н-МкУ	+	+	-	-	1,5	153,3	102,22	2,0
ООО «Автопластинжениринг»	Н-МкСУАкС	+	+	-	+				4,0
АК «Озна»	Н-МЗУР	+	+	-	-	1,9	287,5	151,33	3,2

**Заключение**

Разработанная методика применяется на этапе предварительной оценки стоимости проекта водоснабжения и использует укрупненную технологическую схему. В процессе проектирования уточняются параметры системы водоподготовки и условия достижения заданных показателей качества воды. Это может привести к итерационному процессу уточнения с помощью ИСППР ТВ технологической схемы и новому решению оптимизационной задачи.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Орлов С.П., Мережко А.Г. Информационная система для анализа и моделирования технологий водоподготовки // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 1(23). – С. 233-236.
2. Орлов С.П., Нечаев Д.А., Чуваков А.В. Разработка экспертной системы в составе интеллектуальной системы поддержки принятия решений в области водоподготовки и водоочистки природных вод // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 5. – С. 44-52.
3. Нечаев Д.А. Модели принятия решений в управлении региональной программой водоснабжения // Вестник Волжского университета им. Татищева. – 2013. – № 2(21). – С. 4-8.
4. Орлов С.П., Чуваков А.В., Нечаев Д.А. Предпроектный анализ технологических схем при управлении инвестициями в региональной программе водоснабжения // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3(31). – С. 244-247.
5. Николодзе Г.И., Сомов М.А. Водоснабжение: учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1995. – 688 с.

6. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: Учеб. пособие. Т. 2. – М.: АСВ, 2004. – 496 с.
7. Журба М.Г., Нечаев А.П. Классификаторы технологий очистки природных вод. – М.: ГП НИИ ВОДГЕО, 2000.
8. Сигал И.Х., Иванова А.П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 240 с.

*Статья поступила в редакцию 28 марта 2014 г.*

## **OPTIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF INDUSTRIAL WATER SUPPLY SYSTEMS**

***D.A. Nechaev, S.P. Orlov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The problem of equipment designing for industrial water supply systems is analyzed. Objects of investigation are intakes and water treatment systems, providing water processes for set industries that are located in the area of the region. The use of intelligent decision support system for water treatment technologies is described. As a result of such a system by a set of alternative-processing circuits that contain many different types of devices is formed. The problem of optimal selection of process equipment for the resulting technological schemes is considered. This is the problem of discrete programming with Boolean variables. Constraints of the problem take into account tolerances on values of water quality, energy consumption and other process variables. Examples of the use of the proposed method for several industrial water systems are given.*

**Keywords:** *decision support systems, optimization, discrete programming, water industry, water treatment technologies.*

---

*Dmitry A. Nechaev, Postgraduate Student.  
Sergey P. Orlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*