

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УВЛАЖНЕНИЯ ЗЕРНА ПЕРЕД ПОМОЛОМ

Карпук П. О.

*Научный руководитель – к. э. н., доцент Гринюк Д. А.  
БГТУ*

**Аннотация.** Многие продукты, такие как мука, крупы и комбикорм, производятся на основе зерна, которое составляет примерно 90 % себестоимости этих продуктов. Однако в литературе достаточно мало работ по построению системы автоматического регулирования процесса увлажнения зерна непосредственно по основному параметру – влажность зерна на выходе системы. В данной работе обоснована возможность применения математической модели процесса увлажнения и отволаживания для построения системы автоматического управления с использованием аperiodического регулятора повышенного порядка. Исследование показало, что аperiodический регулятор пригоден для управления исследуемым объектом с характерными особенностями. Предложенный вариант модернизации процесса может позволить увеличить выход муки высших сортов на 0,9–1,3 %.

**Ключевые слова:** автоматизация, увлажнение зерна, объект управления, математическое моделирование, модель идеального вытеснения, запаздывание, аperiodический регулятор, каскадная система, мука высшего сорта, экономическая эффективность.

### *Введение*

В настоящее время автоматизации процесса увлажнения и отволаживания зерна стала особенно важной из-за увеличения количества производителей зерна и уменьшения размеры партии от каждого производителя. Это приводит к значительным колебаниям влажности и технологических свойств зерна. Разработка стратегии управления процессом, которая повышает качество конечного продукта и ускоряет перевод компонента помольной смеси из начального в конечное состояние по технологическим свойствам, а также способы реализации этой стратегии являются очень актуальными. Большинство промышленных систем строятся на основе измерения косвенных параметров [1]. В ряде работ [2, 3] предложены математические модели процесса отволаживания зерна, которые предлагают сложный алгоритм управления процессом. Таким образом, предлагается система управления, обеспечивающая простоту настройки и требуемые качества технологического процесса.

### *Результаты и их обсуждение*

Продуктивность использования зерна при переработке значительно определяется технологическим процессом зерноочистительного отделения,

связанного с гидротермической обработкой зерна, задача которой состоит в направленном изменении его технологических свойств. Сущность процесса заключается в увлажнении зерна водой в шнековом увлажнителе с последующим его отволаживанием в течении времени, необходимого для придания ему необходимых свойств [4].

Широко распространенные автоматизированные системы увлажнения зерна работают на основе разомкнутой системы управления (контроль расхода зерна и его влажности). Не уделяется внимание контролю процесса влагопереноса в бункере отволаживания. Ошибки всех входящих в них приборов суммируется, что приводит к абсолютной погрешности 0,3–0,5 %, в отличии от систем с обратной связью, где ошибки остальных приборов обрабатываются датчиком влажности продукта на выходе. Контролируя влажность зерна на выходе из шнека увлажнения и обеспечив прибавку воды до требуемого значения влажности, мы никогда не можем гарантировать, что добавленная нами вода сразу будет принята зерном в полном объеме, т. к. это живой продукт. Ему необходимо время, для чего в технологическом процессе предусмотрен длительный период для пребывания в бункерах для отволаживания [5].

Исходя из рис. 1, технологический процесс в простейшем случае имеет управляющее воздействие подачи воды  $U_2$  для регулирования влажности зерна на этап его увлажнения соответственно; управляющие воздействия  $U_1$ ,  $U_3$  – подачей зерна для регулирования уровня в бункере временем отволаживания. Предлагается, что объем зерна в бункере  $V(t) = V_0 = const$ . Это достигается равенством притока и отбора продукта.

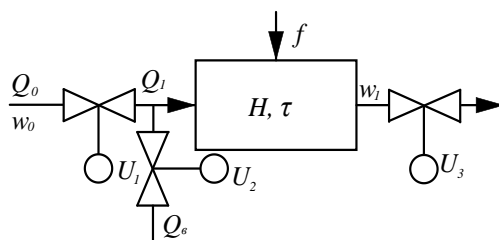


Рис. 1. Блок схема процесса отволаживания как объекта управления  
 $Q_0$  – расход зерна;  $Q_в$  – расход воды;  $Q_1$  – суммарный расход;  $H$  – уровень в бункере;  $\tau$  – время отволаживания в бункере;  $w_0$  – влажность до увлажнения;  $w_1$  – влажность после увлажнения

Источник: [3]

Про процесс как объект управления можно сказать следующее:

- представляется нелинейным, многомерным, взаимосвязанным, т. е. изменение подачи зерна влияет не только на время отволаживания, но и на влажность увлажнения;

- подвержен влиянию случайных величин, например, температуры окружающей среды, входной влажности и свойств зерна;

– имеет значительное транспортное запаздывание по каналу выходной влажности зерна.

Исходя из рис. 2 в рассмотренном случае расходы зерна и воды – это управляющие воздействия, влажность и время отволаживания – выходные, качественные показатели процесса, уровень в бункере – промежуточная переменная, изменение исходной влажности и свойств зерна  $\alpha$  – возмущающие воздействия.

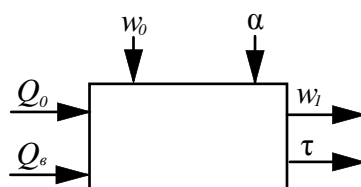


Рис. 2. Схема динамических каналов

Источник: собственная разработка на основании [3]

Если объект управления содержит запаздывание большой величины и отсутствует возможность разделения объекта на отдельные составляющие, то в этом случае можно предложить специальную структуру, например, с использованием предиктора. В современных системах управления большинство алгоритмов реализуются в цифровом виде. В основном алгоритмы реализуются с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК) или отдельных модулей и микропроцессорных регуляторов.

В дискретных системах интересны компенсационные регуляторы, которые обеспечивают аperiodическую обработку ступенчатого задающего сигнала за  $n$  – тактов, где  $n$  – порядок объекта управления. Эти регуляторы называются аperiodическими. Данный регулятор можно применять как для объектов с большим транспортным запаздыванием, так и при синтезе каскадной системы управления для обеспечения высокой скорости внутреннего контура [6]. В данной работе синтез основан на  $z$  – преобразовании элементов системы управления [7].

В общем случае, передаточная функция объекта и регулятора представляется в следующем виде:

$$G_R(z) = \frac{Q(z)}{1 - P(z)}; G_P(z) = \frac{A(z)}{B(z)}, \quad (1)$$

где  $Q(z)$ ,  $P(z)$  – многочлены передаточной функции регулятора;  $A(z)$ ,  $B(z)$  – многочлены передаточной функции объекта.

Коэффициенты многочленов  $Q(z)$ ,  $P(z)$  можно найти на основании коэффициентов многочленов функции  $z$  – передачи непрерывного объекта  $A(z)$ ,  $B(z)$ .

Основным недостатком аperiodического регулятора является максимальная величина начального значения управляющей переменной  $u(0)$ . Если

увеличить время установления на один такт, то можно заранее определить начальное значение управляемой переменной  $u(0)$ . Так как этот сигнал имеет максимальную величину, его можно ограничить, задав допустимое значение  $u(0)$  при синтезе регулятора.

Наилучшего качества переходного процесса по регулируемой величине с применением аperiodического регулятора можно достичь в том случае, когда модель объекта и запаздывание известно точно.

Процесс перемешивания в шнеке увлажнения сравнительно мал, поэтому описываем динамику в бункере отволаживания. Математическая модель основана на модели идеального вытеснения. За структуру потока принимается поршневое движение без перемешивания зерна в продольном направлении при равномерном распределении влажности вещества в перпендикулярном сечению направлению движения.

На основе модели идеального вытеснения получена математическая модель в статике в соответствии с формулой:

$$w_1(l) = \frac{Q_0}{Q_1} w_0 + \frac{Q_0}{Q_1} (1 - e^{-\alpha(T)\tau(l)}), \quad (2)$$

где  $l$  – сечение бункера;  $\alpha(T)$  – константа влагопереноса.

Предположим, что  $V(t) = V_0 = \text{const}$ . Это достигается обеспечением равенства притока и отбора продукта. Если необходимо изменить время пребывания от:

$$\tau_0 = \frac{V_0}{G}, \quad (3)$$

где  $G$  – производительность.

До значения:

$$\tau_0 = \frac{V_0}{G + \Delta}. \quad (4)$$

Необходимо изменить одновременно расходы продукта на входе и выходе бункера на величину:

$$\Delta = \frac{V_0 - G\tau}{\tau}. \quad (5)$$

Прирост влаги в зерне, для этого случая с учетом наличия транспортного запаздывания по каналу управления имеет вид уравнения (6):

$$\Delta w_{1t}(l) = x_{10}(l)[1 - e^{\alpha(T)(\Delta/G)(t-\tau)}], \quad (6)$$

где  $x_{10}(t)$  – начальные условия концентрации свободной влаги для сечения  $l$ .

С учетом (2) и (6) уравнение, характеризующее изменение влажности зерна во времени в каждом сечении, запишем в виде выражения (7):

$$w_1(t, l) = w_1(l) + \Delta w_{1t}(l). \quad (7)$$

Как следует из (6) и (7) влажность в каждом сечении бункера изменяется по экспоненциальному закону. Временная характеристика соответствует апериодическому звену 1-го порядка с постоянной времени, равной в соответствии с (8):

$$T = \frac{1}{\alpha(T) \int_0^t \tau dt}. \quad (8)$$

Коэффициент передачи в этом случае равен:

$$k = \frac{\Delta w_{1t}(l)}{x_{10}} = 1. \quad (9)$$

В производственных условиях влажность зерна регулируется изменением расхода воды на входе. Поэтому полная динамическая характеристика объекта с учетом (6) и (7) по каналу  $w_1(t, l) - Q_v$  соответствует апериодическому звену 1-го порядка, последовательно соединенным со звеном запаздывания.

Полученная модернизированная структурная схема системы автоматического управления процессом увлажнения и отволаживания зерна перед помолотом представлена на рис. 3. Моделирование производилось в MATLAB с помощью SIMULINK.

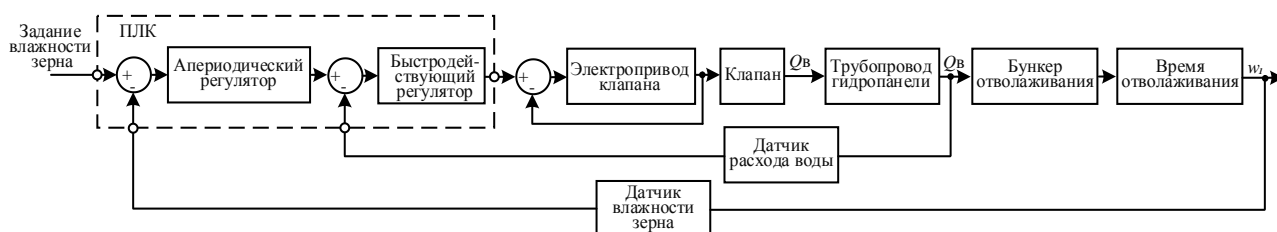


Рис. 3. Структура каскадной системы с апериодическим регулятором  
Источник – собственная разработка автора

Технологический эффект, достигнутый в результате применения автоматизированной системы увлажнения зерна, оценивают или по конечному результату переработке, или по некоторым промежуточным результатам. Например, по количеству и качеству образовавшегося частиц эндосперма. Их зольность в значительной степени определяют выход и качество муки. Между этими показателями существует тесная корреляция.

График влияния влажности пшеницы на средневзвешенную зольность муки при его увлажнении представлен на рис. 4. Рациональные параметры процесса определяются посредством проведения серии лабораторных исследований.

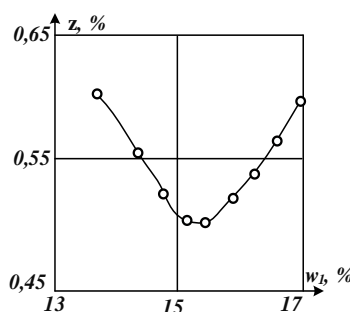


Рис. 4. Влияние влажности пшеницы на средневзвешенную зольность муки  
Источник: [7]

На рис. 4 хорошо виден минимум, определяющий оптимальное значение влажности. Одновременно с уменьшением зольности выход муки обычно повышается [8]. Таким образом, точность работы системы играет ключевую роль. Известно, что изменение влажности перед помолом на 0,1 % вызывает колебания выхода муки высшего сорта на  $\pm 0,7$  %, первого сорта до  $\pm 0,5$  % [9].

Прибыль, получаемая за счет увеличения объема производства готовой продукции высшего качества за один месяц, в приближенном виде можно найти, опираясь на выражение (11) предложенное в [10]:

$$П = 30 \cdot k \cdot S \cdot N, \quad (11)$$

где  $k$  – коэффициент среднесуточного увеличения объема производства готовой продукции высшего качества за расчетный месяц;  $S$  – прирост отпускной цены за тонну продукции в белорусских рублях благодаря улучшения ее сортности;  $N$  – производительность мельницы.

Например, для Минского комбината хлебопродуктов с производительностью 750 т/сутки при значениях  $k = 0,9$  % и  $S > 90$  белорусских рублей прибыль составляет 18 225 белорусских рублей в месяц.

*Вывод*

В ходе работы был представлен вариант модернизации автоматизированных систем увлажнения зерна с использованием математической модели процесса, отличающаяся добавлением обратной связи в систему. В роли регулятора был выбран апериодический регулятор повышенного порядка, обеспечивающий наилучшее быстродействие. На основе анализа динамики влажности зерна в бункере отволаживания производится коррекция расхода воды, что, в свою очередь, увеличивает выход готовой продукции.

#### **Список использованных источников:**

1. Устройство увлажнения зерна компании «Buhler» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/ru/products/moisture\\_controlunit.html](https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/ru/products/moisture_controlunit.html). – Дата доступа: 05.05.2023.
2. Подгорный, С. А. Автоматизация контроля и управления холодным кондиционированием зерна перед помолом: дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / М. П. Асмаев. – Краснодар, 2005. – 148 с.
3. Горелик, О. Н. Математическое обеспечение автоматизированной системы управления трехстадийным процесса увлажнения и отволаживания зерна пшеницы на мукомольном заводе: дис. канд. техн. наук: 05.13.07 / А. Н. Цирлин. – Москва, 1990. – 171с.
4. Берестнев, Е. В. Рекомендации по организации и ведению технологического процесса на мукомольных предприятиях / Е. В. Берестнев, В. Е. Петриченко, В. В. Петриченко, Москва: ТД ДеЛи, 2020. – 358 с.
5. Особенности автоматизации процесса увлажнения зерна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://agroserver.ru/articles/2166.htm>. – Дата доступа: 05.05.2023.
6. Настройка ПИД-регулятора через цифровой апериодический регулятор / Д. А. Гринюк [и др.] // Химическая технология и техника: материалы докладов 84-й научно-технической конференции, посвященной 90-летию юбилею БГТУ и Дню белорусской науки. Минск: БГТУ. 2020 – С. 254–256.
7. Изерман, Р. Цифровые системы управления: пер. с англ. М.: Мир, 1984. – 541 с.
8. Егоров, Г. А. Технологические свойства зерна / Г. А. Егоров. – Москва. М.: Агропромиздат, 1985 – 334 с.
9. Абашкин, В. А. Оценка эффективности стабилизации технологических процессов мукомольного предприятия / В. А. Абашкин, В. А. Скрыбин, М. М. Фомичев // Научно-технический реферативный сб. «Машиностроение для пищевой промышленности». – М., 1968. – № 4. – С. 21–26.
10. Сотрудники фирмы «Элтикон». Комплексный по ход к решению проблем автоматического увлажнения зерна / Сотрудники фирмы «Элтикон» // Системная интеграция: сб. ст. / Современные технологии автоматизации; сост. С. С. Сорокин. – Москва, 2000. – С. 32–39.