



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И ДИЗАЙНА



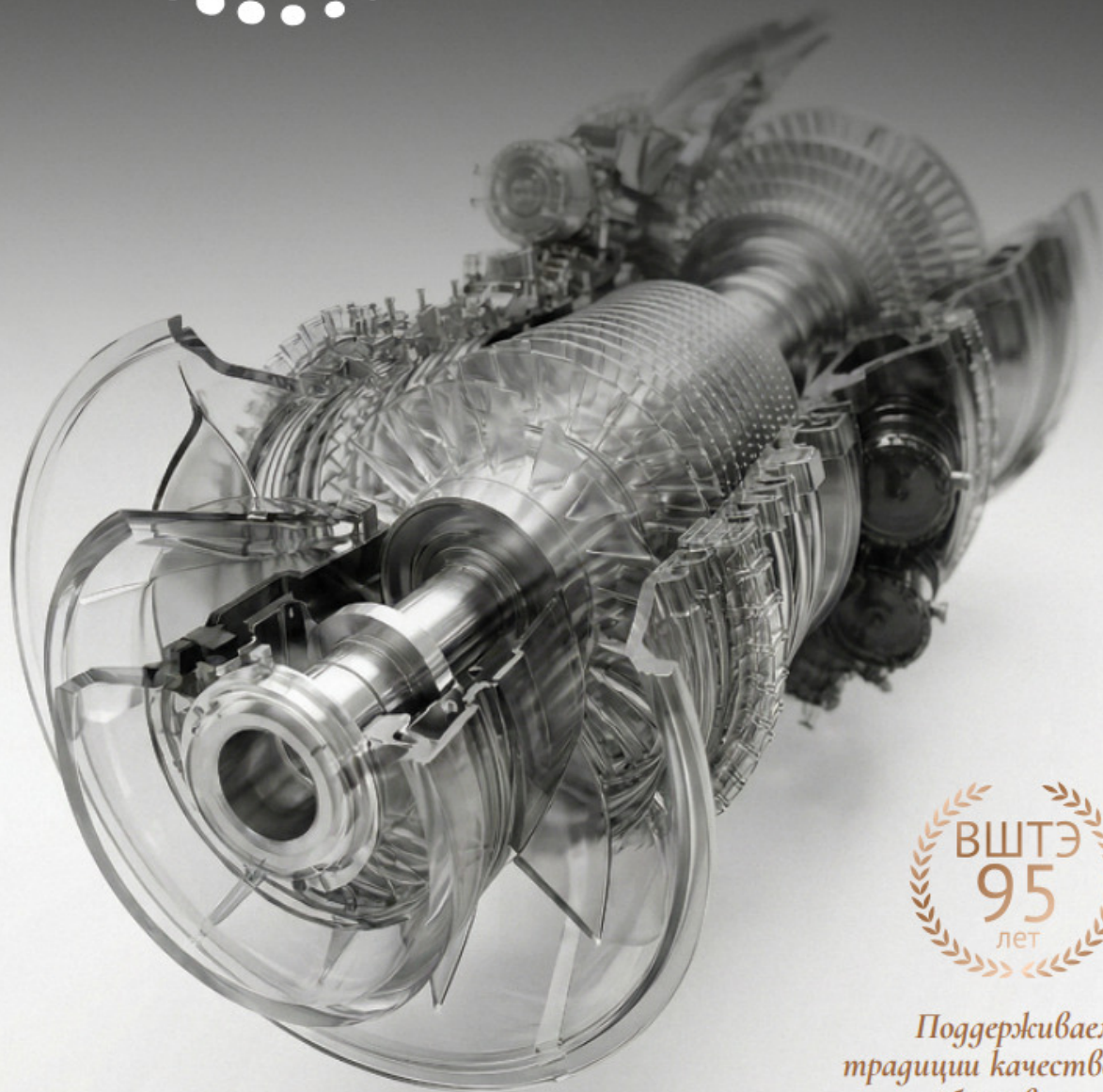
ВЫСШАЯ ШКОЛА
ТЕХНОЛОГИИ
И ЭНЕРГЕТИКИ
(ВШТЭ)

ISSN 3033-7852

ТЕХНОЛОГИЯ и ЭНЕРГЕТИКА

№01 (01) 2026

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



Поддерживаем
традиции качественного
образования

19 Разработка экспертной системы
для оптимизации режима сушки пиломатериалов
с целью минимизации брака в среде CLIPS

81 Автоматизация дозирования
и смешивания флокулянта

102 Расчет тепловых потерь через
скользящие опоры трубопроводов
тепловых сетей

АВТОМАТИЗАЦИЯ ДОЗИРОВАНИЯ И СМЕШИВАНИЯ ФЛОКУЛЯНТА

Владимир Анатольевич Шаряков, Ольга Леонидовна Шарякова,
Федор Денисович Петров

Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета
промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Петров Ф. Д., 2026

Автор-корреспондент: О. Л. Шарякова, e-mail: o_l_shar@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В статье проанализированы особенности функционирования шнекового оборудования технологического процесса получения смеси флоккулянтов в промышленности. Для получения состава из нескольких флоккулянтов заданного качества необходимо обеспечить загрузку бункера определенным объемом предсмеси и процесс перемешивания флоккулянтов с постоянной скоростью для равномерности и нужной концентрации. На основании анализа этих особенностей сформулированы требования к системе автоматического управления электроприводами шнековых механизмов устройства подачи и смешивания сыпучих материалов. Для синтеза системы управления процессом дозирования и смешивания флоккулянта представлены функциональные схемы работы шнекового элеватора, обеспечивающие точность регулирования уровня загрузки предсмеси в бункер, и шнекового смесителя, обеспечивающие равномерное смешивание сыпучего продукта. Асинхронный двигатель с частотным преобразователем является основным двигателем в электроприводах исполнительных механизмов шнеков; скорость смешивания возможно регулировать в широком диапазоне в зависимости от заданных режимов работы смесителя и состава смеси флоккулянтов. Для обеспечения плавности регулирования скорости подачи смеси и точности дозирования предлагается использовать двухконтурное управление приводом шнекового элеватора, сочетающее настройку внутреннего контура скорости на оптимум по модулю с применением пропорционального регулятора и релейный алгоритм во внешнем контуре положения по уровню загрузки продукта в бункер. Для обеспечения первого порядка астатизма системы регулирования предложена настройка на симметричный оптимум контура скорости шнекового смесителя, которая гарантирует стабилизацию скорости смешивания в установившемся режиме и незначительность ошибки в переходных процессах при линейном изменении уровня смеси.

Ключевые слова: флоккулянт, смеситель, шнек, дозирование, электропривод, настройка на оптимум по модулю, настройка на симметричный оптимум, релейный алгоритм, асинхронный двигатель, частотное управление

Для цитирования: Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Петров Ф. Д. Автоматизация дозирования и смешивания флоккулянта. // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 81–89. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_1_1_81-89

AUTOMATION OF FLOCCULANT DOSING AND MIXING

Vladimir Anatolyevich Sharyakov, Olga Leonidovna Sharyakova, Fyodor Denisovich Petrov

Higher School of Technology and Energy of Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
St. Petersburg, Russia

Corresponding author: O. L. Sharyakova, e-mail: o_l_shar@mail.ru

ABSTRACT

The article analyzes the operational features of auger equipment in the industrial process for producing flocculant mixtures. Producing a consistent, high-quality blend of multiple flocculants requires precise loading of the premix hopper and a constant mixing speed to ensure homogeneity and correct concentration. The analysis of these operational specifics has led to the formulation of requirements for the automatic control system governing the electric drives of the auger mechanisms within the bulk material feeding and mixing apparatus. Functional schematics of the auger elevator and auger mixer are presented to support the design of the automated dosing and mixing control system. The elevator schematics ensure accurate premix level control in the hopper, while the mixer schematics are aimed at achieving homogeneous blending of the powder product. The induction motor with a variable frequency drive is the primary motor in the electric actuators of the auger mechanisms. It allows the mixing speed to be adjusted over a wide range,



depending on the specified operating modes of the mixer and the composition of the flocculant mixture. A cascaded (dual-loop) control scheme for the auger elevator drive is proposed to achieve smooth feed rate control and accurate metering. The inner speed control loop is tuned via the modulus optimum method using a proportional (P) controller, while the outer level control loop utilizes a relay-based algorithm to regulate the product fill height in the receiving hopper. To achieve first-order astatism in the control system, tuning the auger mixer speed loop for symmetric optimum has been proposed. This approach guarantees mixing speed stabilization in the steady-state regime and ensures minimal error during transient processes when the mixture level changes linearly.

Keywords: flocculant, mixer, auger, dosing, electric drive, tuning to optimum by modulus, tuning to a symmetric optimum, relay algorithm, induction motor, frequency control

For citation: Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Petrov F. D. Automation of flocculant dosing and mixing. Technology and Energy, vol. 1, no. 1, pp. 81–89. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_1_1_81-89

ВВЕДЕНИЕ

Флокулянты играют незаменимую роль в процессах разделения твердой и жидкой фаз в различных производственных отраслях. Применение флокулянтов в бумажной промышленности позволяет улучшить процесс осаждения целлюлозных волокон и удаление примесей из воды, что повышает качество бумаги и снижает потребление воды и энергии. Для снижения расхода и повышения эффективности применения химических реагентов возникает необходимость в создании универсальной смеси флокулянтов. Смешивание нескольких видов флокулянтов позволяет создать универсальный реагент, который эффективно работает, помогает значительно снизить общий расход химических реагентов, упрощает управление технологическим процессом — вместо обеспечения точной дозировки и контроля двух отдельных реагентов производится контроль одной смеси, что снижает сложность операций и уменьшает вероятность ошибок [1]–[4].

Существующая система автоматизации шнекового смесителя требует постоянного контроля и личного присутствия технического персонала. Применение современных систем автоматизации процесса получения смеси флокулянтов позволяет повысить точность и быстродействие технологического процесса, обеспечить равномерность смешивания и снять нагрузку с обслуживающего персонала [5].

В настоящее время перемещение двух флокулянтов обычно производят вручную или с помощью полуавтоматических систем, что может привести к недостаточной точности и нестабильности процесса. Оператор вручную включает подачу смеси в смеситель, уровень наполнения продукта оператор производит, ориентируясь на смотровое окно, что затрудняет контроль необходимого уровня смеси в бункере и регулирования параметров перемешивания.

Автоматизации дозирования и смешивания флокулянтов является способом достижения требуемых технико-экономических параметров объекта, а именно: стабилизации уровня продукта в бункере смесителя в заданных пределах и скорости смешивания продукта в смесителе для получения однородной смеси [6].

Основным оборудованием для смешивания флокулянтов (рисунок 1) являются шнековый элеватор, предназначенный для предварительного смешивания и транспортировки продукта в смеситель, и смеситель, который осуществляет процесс перемешивания твердых сыпучих или порошкообразных предсмесей, состоящих из нескольких ингредиентов в разных пропорциях с различной удельной массой. Смешивание компонентов происходит мягко, без разрушающего воздействия.

Цель работы — рассмотреть возможность применения стандартных настроек регуляторов в контурах регулирования, обеспечивающих точность отработки заданных значений при ступенчатом и линейном изменении возмущающих воздействий.

Методы исследования: определение основных контуров регулирования в технологических процессах дозирования и смешивания флокулянтов; построение функциональных схем системы регулирования уровня флокулянта в бункере смесителя и системы

регулирования скорости вращения смесителя; построение алгоритмических структур дозирования продукта в бункер и регулирования скорости вращения шнекового смесителя; выбор типов регуляторов и определение их настроек.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ:

- выявить контуры регулирования в системах дозирования продукта в бункер и регулирования скорости вращения шнекового смесителя;





Рисунок 1. Функциональная схема дозирования и смешивания флокулянта

Figure 1. Functional diagram of flocculant dosing and mixing

- определить передаточные функции элементов систем регулирования уровня флокулянта в бункере смесителя и системы регулирования скорости вращения смесителя;
- обосновать структуры регуляторов и предложить стандартные настройки регуляторов в рассматриваемых системах автоматического управления.

Для автоматизации процесса смешивания при помощи шнекового элеватора и шнекового смесителя требуется система автоматического управления (САУ), которая обеспечивает оптимальное смешивание компонентов, высокую точность и максимальную эффективность работы оборудования. Основные требования к такой системе: поддержание стабильного процесса смешивания для получения однородной смеси, контроль уровня продукта, своевременное управление включением и выключением шнекового элеватора для поддержания заданного уровня смеси в бункере, возможность настройки различных параметров (скорость вращения, время смешивания) для адаптации к различным рецептурам, видам сырья и условиям производства. В результате анализа технологического процесса и его условий было выявлено, что для оптимизации необходимо регулировать скорость вращения шнека в смесителе и управлять подачей продукта в смеситель с помощью шнекового элеватора для обеспечения заданного уровня продукта в бункере.

Для контроля уровня продукта используется ёмкостной датчик, установленный в бункере. Он измеряет уровень на основе изменения ёмкости, вызванного присутствием материала. На основании информации, полученной от датчика уровня, происходит включение или останов электродвигателя шнекового элеватора. При достижении заданного максимума уровня продукта в смесителе

происходит отключение электродвигателя шнекового элеватора, предотвращая переполнение или недостаток материала. Это автоматизирует процесс загрузки смесителя, обеспечивает точное управление подачей продукта, снижает ручной труд и повышает безопасность.

$$u_y = \begin{cases} 10V & \text{если } h_c < h_3 \\ 0V & \text{если } h_c = h_3 \end{cases} \quad (1)$$

Система регулирования уровня продукта в бункере смесителя представляет собой сочетание двух способов управления. Для обеспечения заданной скорости подачи смеси контур скорости настраивают на оптимум по модулю [7]. Такая настройка обеспечит возможность регулирования скорости подачи смеси в бункер. Включение и отключения питания электропривода шнекового элеватора происходит по сигналу от датчика уровня, реализуя релейный закон управления.

Функциональная схема системы регулирования уровня продукта в бункере смесителя представлена на рисунке 2.

Вертикальный шнековый смеситель используется для равномерного смешивания различных материалов. Основные компоненты этого устройства включают электродвигатель, механизм передачи вращения от двигателя к исполнительному органу и сам шнек, который смешивает материалы. Применение асинхронного двигателя с управлением от частотного преобразователя в приводе шнека обеспечивает высокую точность и гибкость регулирования скорости, плавный пуск и останов, снижая механические нагрузки и экономя энергию. Скорость смешивания обеспечивает равномерность готовой смеси, сама скорость меняется в зависимости от продукта. Выполнение этого требования достигается за счет системы автоматического регулирования скорости электропривода [8].



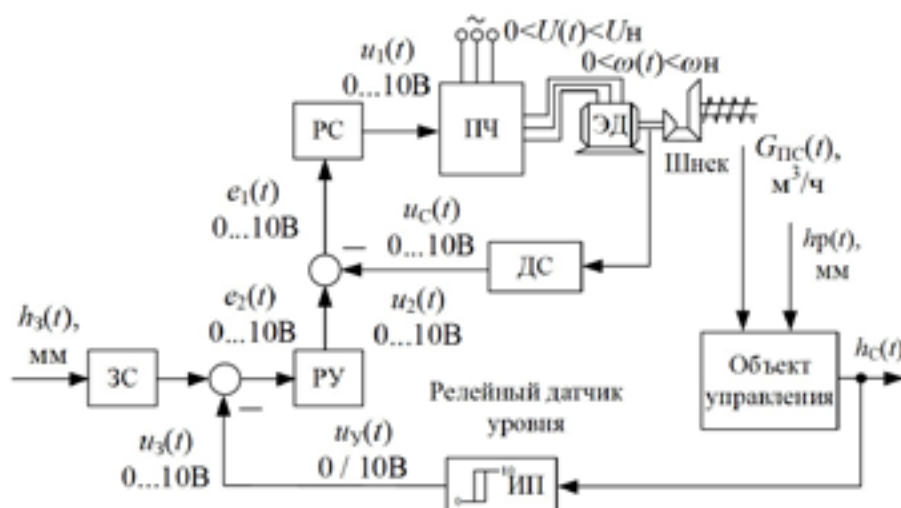


Рисунок 2. Функциональная схема системы регулирования уровня продукта в бункере смесителя: ЗС – задатчик сигнала; РУ – регулятор уровня; РС – регулятор скорости; ПЧ – преобразователь частоты; ЭД – асинхронный электродвигатель; Ред – редуктор; ОУ – объект управления; ИП – релейный датчик уровня; $h_3(t)$ – задание уровня предсмеси; $u_3(t)$ – сигнал задания; $e_1(t)$, $e_2(t)$ – ошибка регулирования; $u_1(t)$, $U(t)$ – напряжение питающее электродвигатель; $G_{пс}(t)$ – подача предсмеси; $h_p(t)$ – расход готовой смеси; $h_c(t)$ – уровень смеси; $u_y(t)$ – выходной сигнал датчика уровня; $u_c(t)$ – выходной сигнал датчика скорости

Figure 2. Functional diagram of the product level control system in the mixer hopper: SG – setpoint generator; LC – level controller; SC – speed controller; FC – frequency converter; IM – induction motor; RU – reduction unit; CO – control object; LS – level switch; $h_3(t)$ – premix level setting; $u_3(t)$ – setpoint signal; $e_1(t)$, $e_2(t)$ – control error; $u_1(t)$, $U(t)$ – voltage supplying the electric motor; $G_{пс}(t)$ – premix feed; $h_p(t)$ – flow rate of the finished mixture; $h_c(t)$ – level mixture; $u_y(t)$ – level sensor output signal; $u_c(t)$ – speed sensor output signal

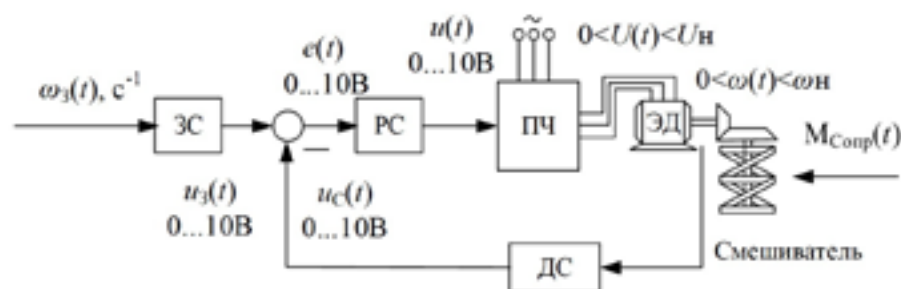


Рисунок 3. Функциональная схема системы регулирования скорости вращения смесителя

Figure 3. Functional diagram of the mixer rotation speed control system

Функциональная схема регулирования скорости шнекового смесителя представлена на рисунке 3.

В соответствии с функциональной схемой контура регулирования уровня продукта в бункере смесителя на рисунке 4 показана алгоритмическая схема системы управления уровнем продукта в бункере смесителя.

Рассмотрим передаточные функции элементов системы [9].

1. Передаточная функция преобразователя частоты.

В электроприводах шнекового механизма транспортирования продукта и вертикального шнекового смесителя

применяется асинхронный двигатель и частотный преобразователь.

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{T_{пч} \cdot p + 1}, \quad (2)$$

где $K_{пч}$ – коэффициент передачи преобразователя; $T_{пч}$ – постоянная времени преобразователя.

Передаточная функция электродвигателя, согласно [10, 11]:

$$W_{эд}(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{K_{эд}}{T_{эм} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{T_m \cdot p} \quad (3)$$

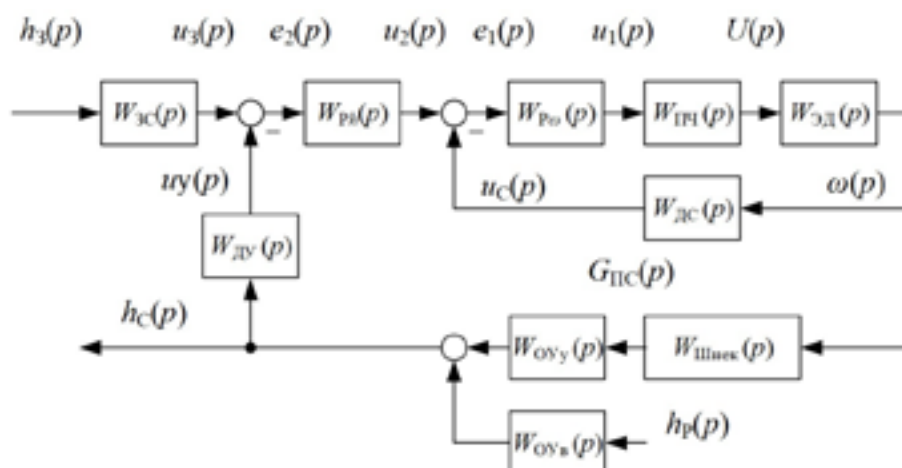


Рисунок 4. Алгоритмическая структура дозирования флокулянта в смеситель: $W_{3c}(p)$ — передаточная функция задатчика сигнала; $W_{ph}(p)$ — передаточная функция регулятора уровня; $W_{po}(p)$ — передаточная функция регулятора скорости; $W_{пч}(p)$ — передаточная функция преобразователя частоты; $W_{эд}(p)$ — передаточная функция электродвигателя; $W_{шнec}(p)$ — передаточная функция шнека; $W_{оуу}(p)$ — передаточная функция объекта управления по управляющему воздействию; $W_{оуs}(p)$ — передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию; $W_{дс}(p)$ — передаточная функция датчика скорости; $W_{дв}(p)$ — передаточная функция датчика уровня

Figure 4. Algorithmic structure of flocculant dosing into the mixer: $W_{3c}(p)$ — setpoint generator signal function; $W_{ph}(p)$ — level controller signal function; $W_{po}(p)$ — speed controller signal function; $W_{пч}(p)$ — frequency converter signal function; $W_{эд}(p)$ — electric motor signal function; $W_{шнec}(p)$ — auger signal function; $W_{оуу}(p)$ — signal function of the control object for the control action; $W_{оуs}(p)$ — signal function of the control object for the disturbing effect; $W_{дс}(p)$ — signal function датчика скорости; $W_{дв}(p)$ — speed mixture level sensor signal function

где $K_{эд} = \frac{2 \cdot M_k}{S_k \cdot \omega_{1H}}$ — коэффициент передачи электро-
двигателя;

$T_{эм} = \frac{1}{(S_k \cdot \omega_{1H})}$ — электромагнитная постоянная элек-

тродвигателя;

S_k — критическое скольжение;

ω_{1H} — номинальная частота вращения поля статора;

T_M — механическая постоянная времени, определяемая приведенным моментом инерции электродвигателя.

2. Передаточная функция шнека. Так как в редукторе происходит преобразование скорости в перемещение, т. е. происходит интегрирование, редуктор будет описываться интегрирующим звеном:

$$W_{шнec}(p) = \frac{G_c(p)}{\omega(p)} = \frac{K_{шнec}}{p}, \quad (4)$$

где $K_{шнec}$ — коэффициент передачи шнека, который характеризует производительность.

3. Передаточная функция объекта управления может быть описана с помощью уравнения

$$W_{оу}(p) = \frac{h(p)}{G_c(p)} = \frac{K_{оу}}{p} = \frac{1}{T_{оу} \cdot p}, \quad (5)$$

где $K_{оу}$ — коэффициент передачи объекта управления; $T_{оу}$ — постоянная времени объекта управления.

4. Передаточная функция датчика скорости:

$$W_{дс}(p) = \frac{u_c(p)}{\omega(p)} = \frac{K_{дс}}{T_{дс} \cdot p + 1}, \quad (6)$$

где $u_c(p)$ — выходное напряжение датчика скорости электродвигателя, В;

$\omega(p)$ — скорость электродвигателя, c^{-1} .

5. Передаточная функция датчика уровня продукта в бункере:

$$W_{дв}(p) = \frac{u_c(p)}{h_c(p)} = K_{дв}, \quad (7)$$

где $u_c(p)$ — выходное напряжение датчика уровня в бункере смесителя, В;

$h_c(p)$ — регулируемая величина уровня продукта в бункере, мм.

Контур скорости в приводе подачи смеси содержит интегрирующее звено. Поэтому при настройке этого контура на оптимум по модулю необходимо применить пропорциональный регулятор (П-регулятор) с передаточной функцией [7, 9, 12–14]:



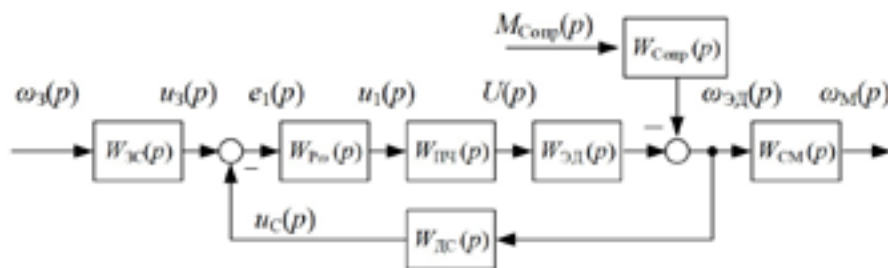


Рисунок 5. Алгоритмическая структура регулирования скорости вращения шнекового смесителя (обозначения см. в комментариях к рисунку 4)

Figure 5. Algorithmic structure for auger agitator speed control (see the legend in the comments to Figure 4)

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{P1}(p) = \beta_1 \\ \beta_1 = \frac{T_{O1}}{2 \cdot T_{\mu 1} \cdot \prod_{i=1}^n K_{i1}} \\ T_{O1} = T_M \quad T_{\mu 1} = T_{\partial M} + T_{\Pi \Psi} + T_{DC} \end{array} \right. , \quad (8)$$

где T_{01} — большая постоянная времени первого контура;

T_m — суммарная малая постоянная времени первого контура;

K_{il} — коэффициенты передачи звеньев, входящих в первый контур.

$$\left\{ \begin{aligned} W_{\text{PC}}(p) &= \beta_{\text{C}} \cdot \frac{\tau_{\text{C}} \cdot p + 1}{\tau_{\text{C}} \cdot p} \\ \beta_{\text{C}} &= \frac{T_{\text{OC}}}{2 \cdot T_{\mu_{\text{C}}} \cdot \prod_{i=1}^n K_{i_{\text{C}}}} \\ T_{\text{OC}} &= T_{\text{M}} \quad T_{\mu_{\text{C}}} = T_{\text{ЭМ}} + T_{\text{ПЧ}} + T_{\text{ДЛС}} \quad \tau_{\text{C}} = 4 \cdot T_{\mu_{\text{C}}} \end{aligned} \right., \quad (9)$$

где T_{0c} — большая постоянная времени контура регулирования скорости; $T_{\Sigma c}$ — суммарная малая постоянная времени первого контура; K_{ic} — коэффициенты передачи звеньев, входящих в контур регулирования скорости.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Настройка контура скорости шнекового элеватора на оптимум по модулю обеспечивает точность регулирования, высокое быстродействие и перерегулирование, не превышающее 5%. Применение частотного управления асинхронного двигателя позволяет регулировать скорость подачи предсмеси в бункер.

Настройка контура скорости шнекового смесителя на симметричный оптимум обеспечивает первый порядок астатизма по возмущению, что приводит к нулевой ошибке регулирования в установившемся режиме работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор типов регуляторов и их настроек в электроприводе при автоматизации производственного процесса обоснован требованиями к режимам работы установки, наличием возмущающих воздействий и видом передаточных функций, представляющих объект регулирования, он также тесно связан с особенностями функционирования всей технологической цепочки. Поэтому применение П-регулятора с настройкой на ОМ в контуре скорости шнекового элеватора подачи сыпучего материала в бункер с объектом управления

Для обеспечения равномерного перемешивания смеси флокулянта система регулирования скорости смесителя содержит контур регулирования скорости, что обеспечивает поддержание заданной частоты вращения смесителя в широком диапазоне регулирования при изменении массы и плотности получаемой смеси.

Алгоритмическая структура смешивания флокулянта представлена на рисунке 5.

Передаточная функция смесителя:

$$W_{\text{CM}}(p) = \frac{\omega_{\text{CM}}(p)}{\omega_{\text{эл}}(p)} = K_{\text{CM}}. \quad (9)$$

В контуре скорости значительны возмущения, обусловленные возникновением момента сопротивления на валу двигателя при смешивании флюктуантов. Контур скорости содержит интегрирующее звено. В этом случае целесообразным является настройка контура скорости на симметричный оптимум с использованием ПИ-регулятора [7, 9, 12–15].

Передаточная функция ПИ регулятора скорости имеет вид:

типа интегрирующее звено и отсутствием возмущений позволяет обеспечить высокое быстродействие, плавность регулирования подачи и точность стабилизации уровня смеси в бункере. Несмотря на то, что в контуре регулирования скорости шнекового смесителя объектом управления также является интегрирующее звено, целесообразно использовать ПИ-регулятор с настройкой на СО, так как именно такая настройка позволяет решить основную задачу стабилизации выходной регулируемой переменной при наличии значительных возмущений. Значительные возмущения обусловлены самим технологическим процессом — постоянной подачей продукта вплоть до заданного уровня, в результате чего на валу исполнительного двигателя возникает момент сопротивления, равный номинальному моменту двигателя. В этом случае настройка на СО обеспечивает точное регулирование скорости вращения электродвигателя, что приводит к равномерности смешивания флокулянтов и предотвращает перегрузки системы.

Список литературы

1. Ардуанова А. М. Выбор коагулянтов и флокулянтов для локальной очистки сточных вод целлюлозно-бумажного производства / А. М. Ардуанова, И. С. Глушанкова // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 5. С. 40–46. DOI 10.35776/VST. 2022.05.05. EDN HUCABZ.
2. Mohammadreza Kamali, Seyedeh Azadeh Alavi-Borazjani, Zahra Khodaparast, Mohammadreza Khalaj, Akram Jahanshahi, Elisabete Costa, Isabel Capela. Additive and additive-free treatment technologies for pulp and paper mill effluents: Advances, challenges and opportunities // Water Resources and Industry. 2019. No. 21. P. 1–22.
3. Программа для определения количества очищенной сточной воды от нормы расхода флокулянта / Э. Н. Бикмеев, Л. З. Касьянова, А. А. Исламутдинова, Э. К. Аминова // Актуальные проблемы и направления развития технологий органического и неорганического синтеза: Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, Стерлитамак, 14–15 мая 2024 года. Уфа: ООО «Информреклама», 2024. С. 316–319. EDN NIYMKU.
4. Карпухина Е. В. Повышение эффективности использования полимерных флокулянтов в очистке сточных вод / Е. В. Карпухина, М. В. Бузаева, И. А. Макарова // Актуальные проблемы техносферной безопасности: Сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных, преподавателей, Ульяновск, 20–24 мая 2024 года. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2024. С. 120–122. EDN ADTYMY.
5. Мухамбетов Д. З. Проблемы автоматизации дозирования сыпучих материалов / Д. З. Мухамбетов, И. Ю. Тюрин, А. А. Лушников // Инновационные технологии: опыт, проблемы, перспективы развития, Тверь, 25 октября 2023 года. Тверь: Тверская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. С. 367–369. EDN PFWSTE.
6. Горобченко С. Л. Методика выбора исполнительных устройств по точности регулирования в технологических схемах целлюлозно-бумажного производства / С. Л. Горобченко, Д. А. Ковалев // Трубопроводная арматура и оборудование. 2024. № 2 (131). С. 26–28. EDN AMXFKD.
7. Аналитическая настройка регуляторов в каскадной системе автоматического регулирования / Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, В. А. Лебедева // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2022. № 4. С. 137–144. DOI 10.46418/2079-8199_2022_4_20. EDN LQZTQE.
8. Application of linear asynchronous motors for high-speed ground transport / S. T. Akhatov, V. G. Solonenko, N. M. Makhmetova [et al.] // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2021. Vol. 2, No. 446. P. 21–36. DOI 10.32014/2021.2518-170X. 31. EDN RDAJWE.
9. Ковалев Д. А. Моделирование объектов управления: Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения курсовой работы / Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна Высшая школа технологии и энергетики, 2023. 153 с. EDN WPMYWP.
10. Янгиров И. Ф. Математическая модель асинхронного двигателя с полым ротором и улучшенными механическими характеристиками / И. Ф. Янгиров // Технология машиностроения. 2023. № 9. С. 10–13. EDN QNNWXX.
11. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
12. Синтез двухконтурной системы автоматического управления уровнем воды парового котла / Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, В. А. Лебедева // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2022. № 3. С. 136–142. DOI 10.46418/2079-8199_2022_3_24. EDN SURVKI.
13. Аналитическая настройка регуляторов в каскадной системе автоматического регулирования разряжением / Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, В. А. Лебедева // Современная наука и инновации. 2023. № 3 (43). С. 36–47. DOI 10.37493/2307-910X. 2023.3.4. EDN RBRXIZ.
14. Разработка имитационной модели системы автоматического управления уровнем зелёного щёлоча в бачке-растворителе плава содорегенерационного котлоагрегата / Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, М. А. Рубцова // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2023. № 67 (93). С. 74–78. DOI 10.36807/1998-9849-2023-67-93-74-78. EDN EYNWWD.
15. A Low Dynamic Deviation and High Robustness Position Control Strategy Based on Virtual Reference / T. Liu,



Q. Tong, Q. Zhang, K. Liu // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 32290–32300. DOI 10.1109/ACCESS.2022.3161748. EDN JOTPWN.

References

1. Arduanova, A. M. Selection of coagulants and flocculants for local wastewater treatment of pulp and paper production / A. M. Arduanova, I. S. Glushankova // Water supply and sanitary engineering. 2022. No. 5. pp. 40–46. DOI 10.35776/VST.2022.05.05. EDN HUCABZ.
2. Mohammadreza Kamali, Seyedeh Azadeh Alavi-Borazjani, Zahra Khodaparast, Mohammadreza Khalaj, Akram Jahanshahi, Elisabete Costa, Isabel Capela. Additive and additive-free treatment technologies for pulp and paper mill effluents: Advances, challenges and opportunities // Water Resources and Industry. 2019. No. 21. P. 1–22.
3. A program for determining the amount of purified wastewater from the flocculant consumption rate / E. N. Bikmeev, L. Z. Kasyanova, A. A. Islamutdinova, E. K. Aminova // Actual problems and directions of development of organic and inorganic synthesis technologies: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Sterlitamak, May 14–15, 2024. Ufa: Informreklama LLC, 2024. pp. 316–319. EDN NIYMKU.
4. Karpukhina, E. V. Improving the efficiency of using polymer flocculants in wastewater treatment / E. V. Karpukhina, M. V. Buzaeva, I. A. Makarova // Actual problems of technosphere security: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, Young Scientists, and Teachers, Ulyanovsk, May 20–24, 2024. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2024. pp. 120–122. EDN ADTYMY.
5. Mukhambetov D. Z. Problems of automation of dosing of bulk materials / D. Z. Mukhambetov, I. Yu. Tyurin, A. A. Lushnikov // Innovative technologies: experience, problems, development prospects, Tver, October 25, 2023. Tver: Tver State Agricultural Academy, 2023. pp. 367–369. EDN PFWSTE.
6. Gorobchenko, S. L. Method of selecting actuators for the accuracy of regulation in technological schemes of pulp and paper production / S. L. Gorobchenko, D. A. Kovalev // Pipeline fittings and equipment. 2024. № 2 (131). Pp. 26–28. EDN AMXFKD.
7. Analytical adjustment of regulators in a cascade automatic control system / D. A. Kovalev, V. A. Sharyakov, O. L. Sharyakova, V. A. Lebedeva // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences. 2022. No. 4. pp. 137–144. DOI 10.46418/2079-8199_2022_4_20. EDN LQZTQE.
8. Application of linear asynchronous motors for high-speed ground transport / S. T. Akhatov, V. G. Solonenko, N. M. Makhmetova [et al.] // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2021. Vol. 2, No. 446. P. 21–36. DOI 10.32014/2021.2518-170X. 31. EDN RDAJWE.
9. Kovalev D. A., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L. Modeling of control objects: An educational and methodical manual intended for course work. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design Higher School of Technology and Energy, 2023. 153 p. EDN WPMYWP.
10. Yangirov, I. F. Mathematical model of an asynchronous motor with a hollow rotor and improved mechanical characteristics / I. F. Yangirov // Technology of mechanical engineering. 2023. No. 9. pp. 10–13. EDN QNNWXX.
11. Usoltsev A. A. Frequency control of asynchronous motors: A textbook. St. Petersburg: St. Petersburg State University of ITMO, 2006. 94 c
12. Synthesis of a two-circuit automatic water level control system for a steam boiler / D. A. Kovalev, V. A. Sharyakov, O. L. Sharyakova, V. A. Lebedeva // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences. 2022. No. 3. pp. 136–142. DOI 10.46418/2079-8199_2022_3_24. EDN SURVKI.
13. Analytical adjustment of regulators in a cascade system of automatic discharge control / D. A. Kovalev, V. A. Sharyakov, O. L. Sharyakova, V. A. Lebedeva // Modern science and innovation. 2023. № 3 (43). Pp. 36–47. DOI 10.37493/2307-910X. 2023.3.4. EDN RBRXIZ.
14. Kovalev D. A., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Rubtsova M. A. Development of a simulation model of an automatic control system for the level of green liquor in a solvent tank for melting a sodaregeneration boiler unit // Proceedings of the St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 2023. № 67 (93). Pp. 74–78. DOI 10.36807/1998-9849-2023-67-93-74-78. EDN EYNWWD.
15. A Low Dynamic Deviation and High Robustness Position Control Strategy Based on Virtual Reference / T. Liu, Q. Tong, Q. Zhang, K. Liu // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 32290–32300. DOI 10.1109/ACCESS.2022.3161748. EDN JOTPWN.



■ Информация об авторах

Шаряков Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2943-676X>, SPIN-код: 7762-0173, AuthorID: 1097174, SCOPUS Author ID: 57205264449, e-mail: v_a_shar@mail.ru.

Шарякова Ольга Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации тех-

нологических процессов и производств Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5932-2766>, SPIN-код: 6251-2565, AuthorID: 391713, SCOPUS Author 57205263930, e-mail: o_l_shar@mail.ru.

Петров Фёдор Денисович, студент Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: aleksandrisakevik@gmail.com.

■ Information about the authors

Sharyakov Vladimir Anatolyevich, PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Automation of Technological Processes and Productions of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2943-676X>, SPIN-code: 7762-0173, AuthorID: 1097174, SCOPUS Author ID: 57205264449, e-mail: v_a_shar@mail.ru.

Sharyakova Olga Leonidovna, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation of Technological Processes and Productions of

the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5932-2766>, SPIN-code: 6251-2565, AuthorID: 391713, SCOPUS Author 57205263930, e-mail: o_l_shar@mail.ru.

Petrov Fyodor Denisovich, student of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; e-mail: aleksandrisakevik@gmail.com.