

2. Процессом электрокоагуляции можно управлять в зависимости от количества электричества, расходуемого на электрообработку сточной воды по требуемой дозе растворения стальных электродов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Петров, В.Г. Разложение водно-жировых эмульсий в сточных водах молочного производства с использованием коагулянтов / В.Г. Петров, М.А. Шумилова, В.В. Столов // Вестник Удмуртского университета. – 2013. – Вып. 4. – С. 27-32.

2. Реконструкция комплекса локальных очистных сооружений производственных сточных вод ОАО «Пружанский молочный комбинат». Техническое задание на объект проектирования. Оценка воз-

действия на окружающую среду по объекту. – Брест, 2015. – 111 с.

3. Долина, Л.Ф. Очистка сточных вод от биогенных элементов: монография / Л.Ф. Долина. – Днепропетровск: Континент, 2011. – 198 с.

4. Мосин, О.В. Технологический расчет установок электрокоагуляции воды / О.В. Мосин // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – № 4. – С. 62-85.

5. Дабаева, М.Д. Эколого-безопасная утилизация отходов: монография / М.Д. Дабаева, И.И. Федоров, А.И. Куликов. – Бурятская гос. с.-х. академия. – 2001. – 94 с.

6. Нефедов, С.С. Электрообработка жидкого субстрата птичьего помета с целью интенсификации метанообразования / С.С. Нефедов, А.В. Крутов // Агропанорама. – 2015. – № 6. – С. 27-31.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 22.11.2019

УДК 631.353.6:62-83

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЗАГРУЗКИ ВАЛЬЦОВОЙ ПЛЮЩИЛКИ-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА

Е.М. Прищепова,

ст. преподаватель каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ

*В молотковых дробилках зерна для регулирования их загрузки используются, как правило, роторные или шнековые дозаторы, которые имеют существенные затраты энергии на подачу зерна. В вальцовых-плющилках-измельчителях зерна наиболее целесообразно использовать шахтный способ загрузки, а степень загрузки регулировать с помощью заслонки системой автоматической стабилизации загрузки. В статье представлены структурная схема и передаточные функции системы автоматической стабилизации загрузки плющилки-измельчителя, а также структурная схема и передаточные функции частотно-регулируемого асинхронного электропривода заслонки с векторным управлением и бездатчиковой обратной связью по скорости. Далее проведен анализ качества работы регулятора загрузки с П- и ПИ-регуляторами при их оптимальной настройке.*

*Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, передаточные функции, параметры настройки, векторное управление, анализ качества работы, синтез параметров системы, система автоматической стабилизации.*

*Rotary or screw dispensers are usually used in hammer grain crushers to regulate their loading, which have significant energy costs for grain supply. The mine method of loading is most advisable to use in roller-flatteners-grain grinders, and a flap with an automatic loading stabilization system regulates the loading degree. The purpose of this article is to synthesize parameters of the automatic load stabilization system for a roller flattener-grain grinder. The article presents the block diagram and transfer functions of the automatic load stabilization system of the flattener-grinder, as well as the block diagram, and transfer functions of a variable frequency asynchronous electric flapper drive with vector control and speed feedback without sensors. Further, the analysis of the quality of the load controller operation with P- and PI- controllers at their optimal setting is carried out.*

*Keywords: variable frequency electric drive, transfer functions, setting parameters, vector control, analysis of work quality, synthesis of system parameters, automatic stabilization system.*

### Введение

В современном сельскохозяйственном производстве все большее применение находят вальцовые плющилки-измельчителя зерна, обеспечивающие плющение влажного зерна с последующей его консервацией и измельчение сухого зерна перед скарм-

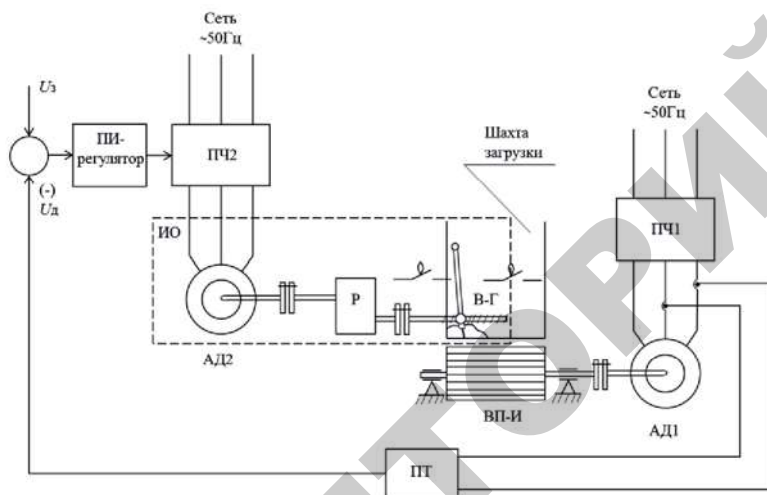
ливанием или изготовлением комбикорма. При этом обеспечивается высокое качество приготовления измельченного зерна, в котором практически полностью отсутствует переизмельченная фракция в отличие от молотковых дробилок зерна, а также круглогодичная загруженность плющилок-измельчителей зерна. Как правило, в молотковых дробилках зерна

для регулирования их загрузки используются роторные или шнековые дозаторы, которые имеют существенные затраты энергии на подачу зерна. В вальцовых плющилках-измельчителях зерна наиболее целесообразно использовать шахтный способ загрузки зерна, а степень загрузки регулировать увеличением или уменьшением рабочей длины вальцов путем установки в шахту загрузки зерна вертикальной заслонки с регулированием ее наклона. При этом наклон заслонки может регулироваться как вручную, так и автоматически.

Цель работы – провести синтез параметров системы автоматической стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна.

**Основная часть**

Согласно технологической схеме системы автоматической стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна (рис. 1), зерно из расходного бункера самотеком поступает в шахту загрузки, имеющую вертикальную заслонку, верхним краем



**Рисунок 1. Технологическая схема системы автоматической стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна:**  
 ВП-И – вальцовая плющилка-измельчитель; ПТ – преобразователь тока; ПИ-регулятор – пропорционально-интегральный регулятор; ИО – исполнительный орган (асинхронный двигатель АД2 + редуктор Р + винт-гайка В-Г); АД1 – приводной асинхронный двигатель вальцов; ПЧ1 и ПЧ2 – преобразователи частоты, соответственно, двигателя АД1 и АД2

прикрепленную к горизонтальной оси вращения и имеющую частотно-регулируемый асинхронный электропривод (ЧРАЭП) ее рычага управления через понижающий редуктор и линейную передачу винт-гайка. Регулируемый электропривод (ЭП) заслонки обеспечивает левое и правое вращение винта линейной передачи, тем самым обеспечивая движение заслонки, уменьшая или увеличивая площадь выходного сечения загрузочной шахты зерна, что в конечном счете уменьшает или увеличивает подачу зерна, а соответственно, и загрузку основного привода плющилки-измельчителя зерна. Основной привод плющилки-измельчителя питается от сети через преобразователь

частоты ПЧ1 соответствующей мощности, который обеспечивает оптимальную скорость вращения вальцов при минимальных удельных энергозатратах на процесс плющения или измельчения зерна [1]. Для отключения вращения привода вертикальной заслонки при ее крайних положениях в плоскости вращения рычага заслонки установлены два конечных выключателя.

Для вывода передаточных функций структурной схемы системы стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна на рис. 2 представлена ее кинематическая схема, дающая соотношение размеров и винт-гайки, и заслонки.

Из кинематической схемы системы стабилизации загрузки очевидно, что угловая скорость на выходе редуктора

$$\omega_p = \frac{\omega_d}{i_p}, \tag{1}$$

где  $\omega_d$  – угловая скорость вала АД2, рад/с;  
 $i_p$  – передаточное число редуктора, о.е.

Линейное перемещение гайки передачи винт-гайка

$$s = \frac{\int \omega_p dt \cdot h_b}{2\pi}, \tag{2}$$

где  $h_b$  – шаг резьбы винт-гайки, м/виток.

Тогда линейное перемещение края заслонки над вальцами

$$l = s \cdot \frac{h_3}{h_{b-g}} = \frac{\int \omega_p dt}{2\pi} h_b \frac{h_3}{h_{b-g}}, \tag{3}$$

где  $h_3$  – расстояние от оси поворота заслонки до ее края, м;

$h_{b-g}$  – среднее расстояние от оси поворота заслонки до гайки линейной передачи винт-гайка, м.

Или в операторном виде

$$l = \frac{\omega_p}{2\pi p} h_b \frac{h_3}{h_{b-g}} = \frac{\omega_d}{2\pi i_p p} h_b \frac{h_3}{h_{b-g}}, \tag{4}$$

где  $p$  – оператор дифференцирования.

Тогда передаточная функция редуктора – винт-гайки-заслонки (РВГЗ)

$$W_{РВГЗ}(p) = \frac{l}{\omega_d} = \frac{k_{нмп}}{i_p p}, \tag{5}$$

где  $k_{нмп} = \frac{h_b}{2\pi} \cdot \frac{h_3}{h_{b-g}}$  – коэффициент передачи

механизма передачи винт-гайка-заслонка, м/рад.

Учитывая, что мощность, затрачиваемая на привод вальцов прямопропорциональна их длине, то и статиче-

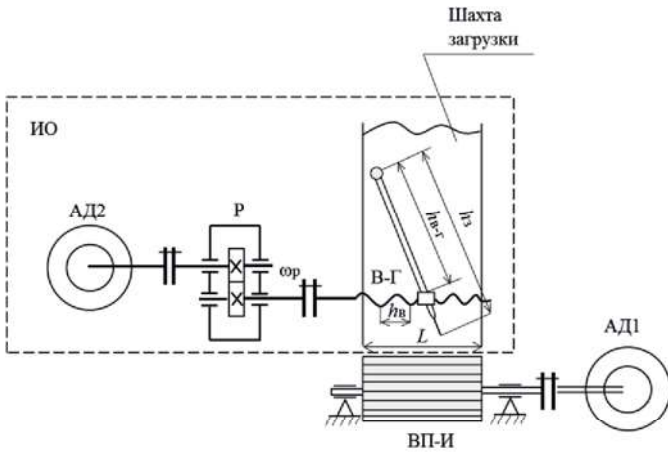


Рисунок 2. Кинематическая схема системы автоматической стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна: ВП-И – вальцовая плющилка-измельчитель; ИО – исполнительный орган (асинхронный двигатель АД2 + редуктор Р + винт-гайка В-Г); АД1 – приводной асинхронный двигатель вальцов; L – длина вальца, м;  $hв$  – шаг резьбы В-Г, м/виток;  $hз$  – расстояние от оси поворота заслонки до ее края, м;  $hв-г$  – среднее расстояние от оси поворота заслонки до гайки В-Г, м

ский момент на вальцах плющилки-измельчителя также прямопропорционален их длине, тогда передаточная функция валцов будет следующей:

$$W_{ВП-И}(p) = \frac{M_c}{L} = k_{м.уд}, \quad (6)$$

где  $k_{м.уд}$  – коэффициент удельного момента загрузки вальца,

$H$ ;  $L$  – длина вальца, м;

$M_c$  – статический момент нагрузки на всей длине вальца, Н·м.

Так как приводной двигатель валцов при регулировании загрузки работает на рабочих линейных участках механической и электромеханической характеристик при малых скольжениях, то ток нагрузки можно приближенно считать активным и вычислять через коэффициент пропорциональности между током и моментом нагрузки по формуле:

$$I = k_{т/м} \cdot M_c, \quad (7)$$

где  $k_{т/м} = \frac{I_H}{M_H}$  – коэффициент пропорциональности между током и моментом нагрузки, А/(Н·м).

Учитывая, что ток обмоток статора АД1 в силу их значительной индуктивности при изменении момента статической нагрузки изменяется во времени по экспоненциальному закону с эквивалентной электромагнитной постоянной времени асинхронного двигателя:

$$T_3 = \frac{\sigma L_1}{r_3}, \quad (8)$$

где  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}$  – коэффициент рассеяния обмоток АД1;

$$r_3 = r_1 + r_2 \frac{L_m^2}{L_2^2} \text{ – эквивалентное сопротивление обмоток АД1, Ом.}$$

На рисунке 3 представлена структурная схема системы стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна.

Структурная схема системы стабилизации загрузки включает в себя:

- однозонный ЧРАЭП с векторным управлением (блок  $W_{ЧРАЭП}(p)$ ), выполненный по аналогии со структурной схемой, приведенной в работе [2];
- ИО механизма загрузки (блок  $W_{РВГЗ}(p)$ );
- рабочие валцы (блок  $W_{ВП-И}(p)$ ) и приводной двигатель (блок  $W_{АД1}(p)$ );
- регулятор загрузки (блок  $W_{РЗ}(p)$ ).

Так как протекание процессов в контуре стабилизации загрузки плющилки-измельчителя имеет медленный характер по сравнению с частотно-регулируемым асинхронным электроприводом, то в данной САР регулируемый привод можно представить пропорциональным звеном с коэффициентом передачи (усиления)

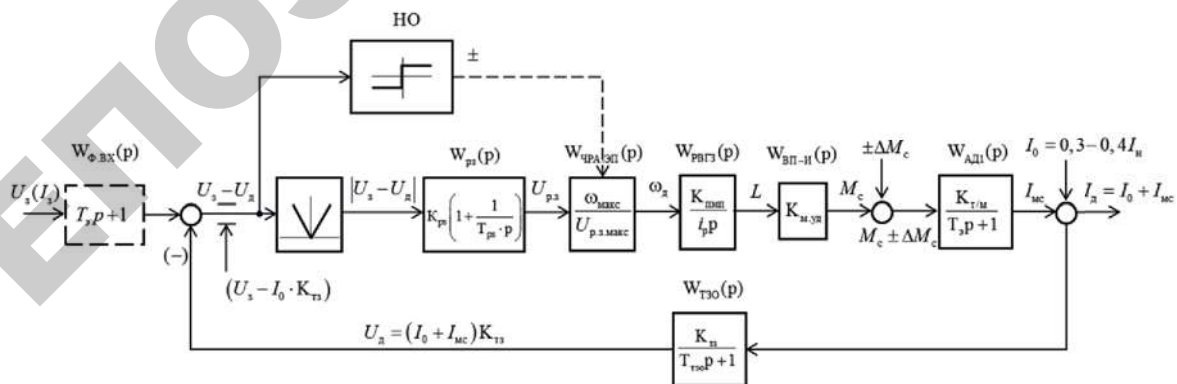


Рисунок 3. Структурная схема системы автоматической стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна

$$k_{\text{чраэп}} = \frac{\omega_{\text{макс}}}{U_{\text{р.з.макс}}}, \quad (9)$$

где  $\omega_{\text{макс}}$  – максимальная угловая скорость АД2, рад/с;  
 $U_{\text{р.з.макс}}$  – максимальный задающий сигнал на выходе регулятора загрузки (на входе регулируемого привода), В.

Контур стабилизации загрузки имеет также инерционную обратную связь по току загрузки основного приводного двигателя (блок  $W_{\text{ТЗО}}(p)$ ), где коэффициент обратной связи по току загрузки приводного двигателя валцов

$$k_{\text{т.з}} = \frac{U_{\text{д.макс}}}{I_{\text{д.макс}}}, \quad (10)$$

где  $U_{\text{д.макс}}$  – максимальное напряжение на выходе блока обратной связи по току, В;

$I_{\text{д.макс}}$  – максимальный ток нагрузки приводного АД1, А.

А малая постоянная времени цепи обратной связи по току загрузки

$$T_{\text{тзо}} = \frac{T_{\text{ст}}}{3}, \quad (11)$$

где  $T_{\text{ст}} = \frac{1}{f_{\text{шим}}} n_{\text{т}}$  – интервал преобразования ре-

зультатов измерения (вычисления) тока загрузки в регулируемом приводе валцов, с;

$n_{\text{т}}$  – количество периодов модуляции для измерения (вычисления) тока загрузки в регулируемом приводе валцов;

$f_{\text{шим}}$  – несущая частота широтно-импульсной модуляции в ЧРАЭП валцов, Гц.

На вход контура регулирования загрузки подается сигнал задания  $U_3$ , который в блоке сравнения на входе контура суммируется с выходным сигналом отрицательной обратной связи по току загрузки  $U_d$ . Если суммарный сигнал  $(U_3 - U_d)$  будет превышать значение  $(U_3 - I_0 \cdot k_{\text{тз}})$ , где  $I_0$  – ток холостого хода АД1), то привод заслонки будет отключен, так как приводной двигатель валцов будет работать на холостом ходу, т.е. без подачи зерна в межвалцовое пространство. Как только сигнал  $(U_3 - U_d)$  будет меньше  $(U_3 - I_0 \cdot k_{\text{тз}})$ , привод заслонки начнет открытие или закрытие заслонки подачи зерна в межвалцовое пространство. Причем, если сигнал  $(U_3 - U_d) > 0$ , то заслонка будет открываться, при этом ноль орган (НО) определяет знак сигнала и дает команду на включение вращения ЧРАЭП при положительном знаке на открытие заслонки, при отрицательном знаке – на закрытие заслонки, т.е. включается реверс привода. При таком построении системы стабилизации загрузки валцовой плющилки-измельчителя зерна выходной сигнал регулятора загрузки  $W_{\text{р.з}}(p)$  является задающим сигналом частотного преобразователя, а соответственно, угловой скорости открытия заслонки через редуктор и винт-гайку. По мере достижения загрузки заданной, разница по абсолютной величине между заданной и текущей загрузкой уменьшается, что приводит к

уменьшению скорости закрытия или открытия заслонки. Остановка двигателя привода заслонки осуществляется при сигнале  $|U_3 - U_d| \approx 0$  на небольшой скорости, что положительно сказывается на точности поддержания загрузки.

Передаточную функцию разомкнутого контура загрузки рассматриваемой системы (рис. 3) определим следующим образом:

$$W_{\text{раз.кз}}(p) = W_{\text{рз}}(p) \cdot K_{\text{чраэп}} \cdot \frac{K_{\text{пмп}}}{i_p p} \cdot K_{\text{м.уд}} \cdot \frac{K_{\text{т/м}}}{T_3 p + 1} \cdot \frac{K_{\text{тз}}}{T_{\text{тзо}} p + 1} = W_{\text{рз}}(p) \cdot \frac{K_{\text{чраэп}} K_{\text{пмп}} K_{\text{м.уд}} K_{\text{т/м}} K_{\text{тз}}}{p \cdot (T_3 p + 1) \cdot (T_{\text{тзо}} p + 1) \cdot i_p} \quad (12)$$

При настройке разомкнутого контура загрузки на модульный оптимум (МО), передаточная функция должна иметь следующий вид:

$$W_{\text{кз мо}}(p) = \frac{1}{2T_{\text{мкз}} \cdot p(T_{\text{мкз}} \cdot p + 1)}, \quad (13)$$

где  $T_{\text{мкз}}$  – малая постоянная времени контура загрузки, с.

Далее передаточную функцию разомкнутого контура загрузки приравняем к желаемому ее виду, решаем относительно передаточной функции регулятора загрузки и в результате получим, при  $T_{\text{мкз}} = T_{\text{тзо}}$ .

$$W_{\text{рз}}(p) = (T_3 \cdot p + 1) \cdot K_{\text{рз}}, \quad (14)$$

$$K_{\text{рз}} = \frac{i_p}{2T_{\text{тзо}} K_{\text{чраэп}} K_{\text{пмп}} K_{\text{м.уд}} K_{\text{т/м}} K_{\text{тз}}} \quad \text{– коэффициент}$$

усиления регулятора загрузки, о.е.

В данном случае имеем пропорциональный регулятор с полученным выше коэффициентом усиления  $K_{\text{рз}}$  и фильтром на входе  $(T_3 \cdot p + 1)$  (рис. 3).

При настройке регулятора загрузки на симметричный оптимум (СО), разомкнутый контур загрузки должен иметь передаточную функцию следующего вида:

$$W_{\text{кз со}}(p) = \frac{4T_{\text{мкз}} \cdot p + 1}{8T_{\text{мкз}}^2 \cdot p^2 (T_{\text{мкз}} \cdot p + 1)}. \quad (15)$$

Аналогично, как и в предыдущем случае, передаточную функцию разомкнутого контура загрузки приравняем к желаемому и решаем относительно передаточной функции регулятора загрузки, при  $T_{\text{мкз}} = T_{\text{тзо}}$

$$W_{\text{рз}}(p) = \frac{((4T_{\text{тзо}} + T_3) \cdot p + 1) i_p}{8T_{\text{тзо}}^2 \cdot p K_{\text{чраэп}} K_{\text{пмп}} K_{\text{м.уд}} K_{\text{т/м}} K_{\text{тз}}}. \quad (16)$$

Далее умножим числитель и знаменатель полученной передаточной функции на  $(4T_{\text{тзо}} + T_3)$ . После несложных преобразований получим

$$W_{\text{рз}}(p) = \left( \frac{1}{T_{\text{рз}} \cdot p} + 1 \right) \cdot K_{\text{рз}}, \quad (17)$$

$$\text{где } K_{pz} = \frac{i_p (4T_{т30} + T_3)}{8T_{т30}^2 K_{чрзп} K_{пмп} K_{м.уд} K_{т/м} K_{тз}}; \quad T_{pz} = 4T_{т30} + T_3.$$

Таким образом, при настройке контура загрузки на СО, получим регулятор загрузки пропорционально-интегрального типа, т.е. ПИ-регулятор.

Затем для анализа качества работы системы загрузки найдем передаточную функцию разомкнутого контура регулирования загрузки вальцовой плющилки-измельчителя при его работе с ПИ-регулятором.

$$W_{раз.кз}(p) = W_{pz}(p) \cdot K_{чрзп} \cdot \frac{K_{пмп}}{i_p p} \cdot K_{м.уд} \cdot \frac{K_{т/м}}{T_3 p + 1} \cdot \frac{K_{тз}}{T_{т30} p + 1} = (T_3 \cdot p + 1) \cdot K_{pz} \cdot K_{чрзп} \cdot \frac{K_{пмп}}{i_p p} \cdot K_{м.уд} \cdot \frac{K_{т/м}}{T_3 p + 1} \cdot \frac{K_{тз}}{T_{т30} p + 1} = \frac{1}{2T_{т30} \cdot p \cdot (T_{т30} p + 1)}. \quad (18)$$

Далее передаточную функцию замкнутого контура по управлению для регулирования загрузки

$$W_{зам.кз}(p) = \frac{1}{W_{т30}(p)} \cdot \frac{W_{раз.кз}(p)}{1 + W_{раз.кз}(p)} = \frac{1}{K_{тз}} \cdot (T_{т30} p + 1) \cdot \frac{1 / (2T_{т30} p \cdot (T_{т30} p + 1))}{1 + 1 / (2T_{т30} p \cdot (T_{т30} p + 1))} = \frac{1 / K_{тз} (T_{т30} p + 1)}{2T_{т30}^2 p^2 + 2T_{т30} p + 1}. \quad (19)$$

Для анализа реакции контура регулирования загрузки на возмущающее воздействие, т.е. наброс и сброс нагрузки  $\Delta M_c$ , определим передаточную функцию замкнутого контура загрузки по возмущению из выражения:

$$W_{зам.кз.в}(p) = \frac{I_d(p)}{-M_c} = \frac{W_{Ад1}(p)}{1 + W_{раз.кз}(p)} = \frac{K_{т/м} / (T_3 p + 1)}{1 + \frac{1}{2T_{т30} p \cdot (T_{т30} p + 1)}} = \frac{2K_{т/м} T_{т30} p \cdot (T_{т30} p + 1)}{2T_3 T_{т30}^2 p^3 + 2(T_3 T_{т30} + T_{т30}^2) p^2 + (2T_{т30} + T_3) p + 1}. \quad (20)$$

Аналогичным образом получены передаточные функции для контура регулирования загрузки вальцовой плющилки-измельчителя при его работе с ПИ-регулятором:

$$W_{раз.кз}(p) = \frac{(4T_{т30} + T_3) p + 1}{8T_3 T_{т30}^3 p^4 + 8T_{т30}^2 (T_3 + T_{т30}) p^3 + 8T_{т30}^2 p^2}; \quad (21)$$

$$W_{зам.кз}(p) = \frac{1}{K_{тз}} \cdot \frac{(T_{т30} p + 1) ((4T_{т30} + T_3) p + 1)}{8T_3 T_{т30}^3 p^4 + 8T_{т30}^2 (T_3 + T_{т30}) p^3 + 8T_{т30}^2 p^2 + (4T_{т30} + T_3) p + 1}; \quad (22)$$

$$W_{зам.кз.в}(p) = \frac{K_{т/м} 8T_{т30}^2 p^2 (T_{т30} p + 1)}{8T_3 T_{т30}^3 p^4 + 8T_{т30}^2 (T_3 + T_{т30}) p^3 + 8T_{т30}^2 p^2 + (4T_{т30} + T_3) p + 1} \approx \frac{K_{т/м} 8T_{т30}^2 p^2 (T_{т30} p + 1)}{8T_{т30}^2 (T_3 + T_{т30}) p^3 + 8T_{т30}^2 p^2 + (4T_{т30} + T_3) p + 1}. \quad (23)$$

Далее проведем расчет параметров настройки системы стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна.

1. Проведем расчет мощности асинхронного двигателя для привода заслонки регулятора загрузки

При расчете мощности АД для привода заслонки необходимо определить наибольшее давление зерна на заслонку при напивно заполненном бункере по формуле:

$$P_3 = \rho_3 g h_{cp} m, \quad (24)$$

где  $\rho_3$  – насыпная плотность зерна, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{пшеницы} = 850$  кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$h_{cp}$  – расстояние от верха засыпки зерна в бункере до середины заслонки, м,  $h_{cp} = 2,1$  м;

$m = \cos^2 \alpha_{чз} + k_{бд} \sin^2 \alpha_{чз}$  – коэффициент, учитывающий боковое давление зерна на наклонную заслонку;

$\alpha_{чз}$  – угол наклона заслонки к горизонту, град;

$k_{бд} = \text{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_e}{2} \right)$  – коэффициент бокового давления зерна на вертикальную заслонку;

$\varphi_e$  – угол естественного откоса, град,  $\varphi_e$  пшеницы = 38°.

Так как основными зерновыми культурами, используемыми в процессах плюшения и измельчения зерна, являются рожь, пшеница, ячмень и овес, то необходимо произвести расчет давления для всех культур и для дальнейшего расчета выбрать наибольшее. Наибольшее давление на заслонку будет оказывать пшеница. Тогда давление зерна на заслонку

$$p_3 = 850 \cdot 9,81 \cdot 2,1 \cdot 0,4406 = 7715 \text{ Н/м}^2,$$

$$m = \cos^2 64^\circ + 0,2379 \sin^2 64^\circ = 0,4406;$$

$$\alpha_{\text{нз}} = \arctg(h_3 / L) = \arctg(0,6 / 0,3) = 64^\circ$$

– максимальный угол наклона заслонки;

$$k_{\text{од}} = \text{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{38^\circ}{2} \right) = 0,2379.$$

Тогда сила, действующая на заслонку при максимальном угле наклона

$$F_3 = p_3 h_3 b_{\text{ш}},$$

где  $b_{\text{ш}}$  – ширина шахты загрузки, м.

$$F_3 = 7715 \cdot 0,6 \cdot 0,2 = 925,8 \text{ Н.}$$

Мощность, затрачиваемая на привод заслонки

$$P_3 = F_3 \cdot v_3, \quad (25)$$

где  $v_3$  – скорость перемещения винт-гайки, приводящей в движение заслонку, м/с ( $v_3$  принимаем равной 0,01 м/с);

$$P_3 = 925,8 \cdot 0,01 = 9,26 \text{ Вт.}$$

Мощность двигателя ЭП заслонки с учетом коэффициента запаса по мощности и коэффициентов полезного действия выбираемого двигателя и механических передач

$$P_{\text{д}} = k_3 \frac{P_3}{\eta_{\text{дв}} \eta_{\text{р}} \eta_{\text{в-г}}} = 1,3 \frac{9,26}{0,53 \cdot 0,9 \cdot 0,7} = 36 \text{ Вт.} \quad (26)$$

Из расчета очевидно, что мощность, затрачиваемая на регулирование загрузки, весьма незначительная в отличие от шнековых и роторных регуляторов. Далее, в качестве приводного двигателя выберем ближайший больший по мощности двигатель серии АИР со следующими техническими данными (табл. 1).

### 2. Расчетные параметры электродвигателя

Номинальная скорость вращения

$$n_{\text{н}} = n_0 (1 - s_{\text{н}}) = 1500 (1 - 0,11) = 1335 \text{ об/мин.} \quad (27)$$

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,09 \text{ рад/с.} \quad (28)$$

Номинальная угловая частота вращения

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi n_{\text{н}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1335}{30} = 139,80 \text{ рад/с.} \quad (29)$$

Номинальный полезный момент на валу двигателя

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{н}}} = \frac{60}{139,8} = 0,4292 \text{ Н·м.} \quad (30)$$

Номинальный ток двигателя

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{60}{3 \cdot 220 \cdot 0,63 \cdot 0,53} = 0,27 \text{ А.} \quad (31)$$

### 3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным

$\cos \varphi_{\text{р}^*}$  определим по графику, приведенному в работе [3]

$$\cos \varphi_{\text{р}^*} = 0,84 \cdot \cos \varphi_{\text{н}} = 0,84 \cdot 0,63 = 0,53;$$

$$\eta_{\text{р}^*} = \eta_{\text{н}} = 0,53.$$

Ток двигателя при частичной нагрузке АД,  $0,75 P_{\text{н}}$  ( $p^* = 0,75$ )

$$I_{11} = \frac{p^* \cdot P_{\text{н}}}{3 \cdot U_{1\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{р}^*}} = \frac{0,75 \cdot 60}{3 \cdot 220 \cdot 0,53 \cdot 0,53} = 0,2427 \text{ А} \quad (32)$$

Далее вычислим значение тока холостого хода АД

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left( p^* I_{1\text{н}} \frac{1 - s_{\text{н}}}{1 - p^* \cdot s_{\text{н}}} \right)^2}{1 - \left( p^* \frac{1 - s_{\text{н}}}{1 - p^* \cdot s_{\text{н}}} \right)^2}} = \sqrt{\frac{0,2427^2 - \left( 0,75 \cdot 0,27 \cdot \frac{1 - 0,11}{1 - 0,75 \cdot 0,11} \right)^2}{1 - \left( 0,75 \frac{1 - 0,11}{1 - 0,75 \cdot 0,11} \right)^2}} = 0,2077 \text{ А} \quad (33)$$

Коэффициент, характеризующий соотношение активного сопротивления статора к ротору  $\beta$  нахо-

**Таблица 1. Технические данные выбранного АД для электропривода заслонки регулятора загрузки**

Тип двигателя	$P_{\text{н}}$ , кВт	$\eta_{\text{н}}$ , %	$\cos \varphi_{\text{н}}$	$s_{\text{н}}$ , %	$\mu_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}$	$\mu_{\text{к}} = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{н}}}$	$\mu_{\text{мин}} = \frac{M_{\text{мин}}}{M_{\text{н}}}$	Синхронная частота вращения $n_0$ , об/мин	$k_t = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{н}}}$	Д, кг·м <sup>2</sup>	Масса, кг
АИР50А4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	1500	4,5	0,000029	2,6

дится в диапазоне 0,6...2,5 [4], принимаем  $\beta=1$ .

Тогда критическое скольжение

$$s_k = \frac{s_H \left( \mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - (1 - 2s_H \cdot \beta(\mu_k - 1))} \right)}{1 - 2s_H \cdot \beta(\mu_k - 1)} = 0,11 \frac{\left( 2,2 + \sqrt{2,2^2 - (1 - 2 \cdot 0,11 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1))} \right)}{1 - 2 \cdot 0,11 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)} = 0,6316. \quad (34)$$

Далее проведем проверку неравенства

$$\left( 1 / s_k^2 \right) > \beta^2, \text{ т.е. } \left( 1 / 0,6316^2 \right) > 1^2.$$

Если условие не выполняется, то корректируют значение  $\beta$  и снова рассчитывают  $s_k$ .

Если это условие выполняется, то рассчитывают коэффициент, характеризующий соотношение индуктивного сопротивления статора к индуктивному сопротивлению контура намагничивания АД.

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2K_n I_{1H}} = 1 + \frac{0,2077}{2 \cdot 4,5 \cdot 0,27} = 1,085. \quad (35)$$

Затем определим параметр

$$A_1 = 3 \cdot U_{1H}^2 (1 - s_H) / (2C_1 \mu_k P_H) = 129228 / (2 \cdot 1,085 \cdot 2,2 \cdot 60) = 451,15 \text{ Ом}. \quad (36)$$

Тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора АД

$$r_2' = A_1 / (\beta + 1 / s_k) C_1 = 451,15 / (1 + 1 / 0,6316) 1,085 = 160,96 \text{ Ом}. \quad (37)$$

Активное сопротивление статорной обмотки

$$r_1 = C_1 r_2' \beta = 1,085 \cdot 160,96 \cdot 1 = 174,64 \text{ Ом}. \quad (38)$$

Далее определим коэффициент, характеризующий соотношение индуктивное сопротивление короткого замыкания АД и приведенного активного сопротивления ротора

$$\gamma = \sqrt{\left( 1 / s_k^2 \right) - \beta^2} = \sqrt{\left( 1 / 0,6316^2 \right) - 1^2} = 1,23. \quad (39)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{кн} = \gamma C_1 r_2' \beta = 1,23 \cdot 1,085 \cdot 160,96 = 214,61 \text{ Ом}. \quad (40)$$

Далее найдем расчетное критическое скольжение из выражения

$$s_{кр} = \frac{C_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + X_{кн}^2}} = \frac{1,085 \cdot 160,96}{\sqrt{174,64^2 + 214,61^2}} = 0,6312 \quad (41)$$

Так как рассчитанное критическое скольжение  $s_{кр}$  практически совпадает с рассчитанным выше  $s_k$ , то продолжаем расчет индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток ротора и статора. Если  $s_{кр}$  и  $s_k$  не совпадают, то проводят корректировку коэффициента  $\beta$  согласно методике, приведенной в [5].

$$X_{2\sigma} = 0,58 X_{кн} / C_1 = 0,58 \cdot 214,61 / 1,085 = 114,72 \text{ Ом}; \quad (42)$$

$$X_{1\sigma} = 0,42 X_{кн} = 0,42 \cdot 214,61 = 90,14 \text{ Ом}. \quad (43)$$

Из векторной диаграммы АД ЭДС ветви намагничивания  $E_\mu$ , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$E_\mu = \sqrt{\left( U_{1H} \cos \varphi_H - r_1 I_{1H} \right)^2 + \left( U_{1H} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - X_{1\sigma} I_{1H} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left( 220 \cdot 0,63 - 174,64 \cdot 0,27 \right)^2 + \left( 220 \sqrt{1 - 0,63^2} - 90,14 \cdot 0,27 \right)^2} = 172,71 \text{ В}, \quad (44)$$

тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_\mu = E_\mu / I_0 = 172,71 / 0,2077 = 831,57 \text{ Ом}. \quad (45)$$

Результаты расчета активных и индуктивных сопротивлений АД приведены в таблице 2.

**Таблица 2. Расчетные активные и индуктивные сопротивления АД**

$r_1$ , Ом	$X_{1\sigma}$ , Ом	$r_2'$ , Ом	$X_{2\sigma}$ , Ом	$X_\mu$ , Ом
174,64	90,14	160,96	114,72	831,57

Далее рассчитаем номинальный электромагнитный момент двигателя

$$M_{эм.н} = \left[ 3U_{1н}^2 r_2' \right] \times \left[ \omega_0 s_n \left( X_{кн}^2 + \left( r_1 + \frac{r_2'}{s_n} \right)^2 + \left( \frac{r_1 r_2'}{s_n X_{\mu}} \right)^2 \right) \right]^{-1} = \left[ 3 \cdot 220^2 \cdot 160,96 \right] \times \left[ 157,08 \cdot 0,11 \left( 214,61^2 + \left( 174,64 + \frac{160,96}{0,11} \right)^2 + \left( \frac{174,64 \cdot 160,96}{0,11 \cdot 831,57} \right)^2 \right) \right]^{-1} = 0,4791 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (46)$$

**4. Расчетные параметры структурной схемы АД согласно работе [6].**

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = \frac{X_{1\sigma} + X_{\mu}}{2\pi f_1} = \frac{90,14 + 831,57}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,9354 \text{ Гн}; \quad (47)$$

– ротора

$$L_2 = \frac{X_{2\sigma} + X_{\mu}}{2\pi f_1} = \frac{114,72 + 831,57}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,0137 \text{ Гн}; \quad (48)$$

– индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре

$$L_M = \frac{X_{\mu}}{2\pi f_1} = \frac{831,57}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,6483 \text{ Гн}. \quad (49)$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_M^2}{L_1 L_2} = 1 - \frac{2,6483^2}{2,9354 \cdot 3,0137} = 0,2072 \text{ Гн}. \quad (50)$$

Эквивалентное сопротивление

$$r_3 = r_1 + r_2' \frac{L_M^2}{L_2^2} = 174,64 + 160,96 \frac{2,6483^2}{3,0137^2} = 298,93 \text{ Ом}. \quad (51)$$

Электромагнитные постоянные

$$T_3 = \frac{\sigma L_1}{r_3} = \frac{0,2072 \cdot 2,9354}{298,93} = 0,002 \text{ с}; \quad (52)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{r_2'} = \frac{3,0137}{160,96} = 0,019 \text{ с}. \quad (53)$$

Значение номинального потокосцепления двигателя

$$\Psi_{2н} = \sqrt{2} I_0 L_M = \sqrt{2} \cdot 0,2077 \cdot 2,6483 = 0,7779 \text{ Вб}. \quad (54)$$

**5. Структурная схема ЧРАЭП**

Структурная схема ЧРАЭП заслонки с векторным управлением приведена на рисунке 4. ЭП реализован по схеме однозонного ЭП с независимым управлением потокосцеплением и бездатчиковой обратной связью по скорости.

Постоянная времени цепи обратной связи по току

$$T_{то} = \frac{T_{ст}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,000333 \text{ с}, \quad (55)$$

где  $T_{ст} = \frac{1}{f_{шим}} n_{\tau} = \frac{1}{8000} \cdot 8 = 0,001 \text{ с};$

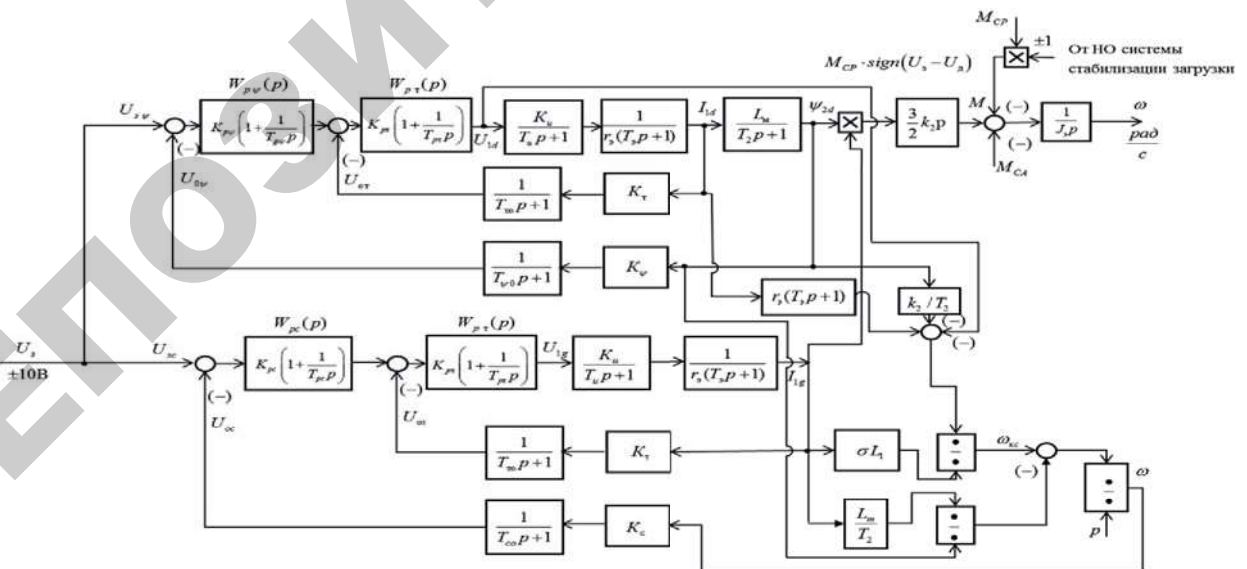


Рисунок 4. Структурная схема ЧРАЭП заслонки с векторным управлением и бездатчиковой обратной связью по скорости



$$n_r=8;$$

$$f_{шм}=8000 \text{ Гц.}$$

Постоянная времени цепи обратной связи по токосцеплению

$$T_{\psi 0} = \frac{T_{св}}{3} = \frac{0,008}{3} = 0,00267 \text{ с,} \quad (56)$$

$$\text{где } T_{св} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_{шм}}\right) n_{\psi} = \left(16 \cdot \frac{1}{8000}\right) \cdot 4 = 0,008 \text{ с}$$

– интервал расчета потокосцепления;  
 $n_{\psi}=4$ .

Постоянная времени цепи обратной связи по скорости

$$T_{\omega 0} = \frac{T_{св}}{3} = \frac{0,008}{3} = 0,00267 \text{ с,} \quad (57)$$

$$\text{где } T_{св} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_{шм}}\right) n_c = \left(16 \cdot \frac{1}{8000}\right) \cdot 4 = 0,008 \text{ с}$$

– период расчета (измерения) скорости;  
 $n_c=4$ .

### 6. Оптимизация контуров САР ЭП

#### 6.1. Оптимизация контура тока

Контур токов  $I_{1d}$  и  $I_{1g}$  идентичные.

Контур тока характеризуется одной большой постоянной времени в прямом канале  $T_3=0,002$  с и двумя малыми постоянными времени в прямом канале, т.е. преобразователя частоты

$$T_{и} = \frac{0,5}{f_{шм}} = \frac{0,5}{8000} = 0,625 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (58)$$

и в цепи обратной связи  $T_{то}=0,000333$  с.

В качестве регулятора тока примем ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{рт}(p) = K_{рт} \left(1 + \frac{1}{T_{рт} p}\right) \quad (59)$$

и настраиваем контур тока на МО:

$$K_{рт} = \frac{T_3 T_3}{a_{ит} T_{мг} K_{и} \cdot K_{т}} =$$

$$= \frac{0,002 \cdot 298,93}{2 \cdot 0,000396 \cdot 31,1 \cdot 43,46} = 0,559$$

– коэффициент усиления регулятора тока,

$$\text{где } T_{мг} = T_{и} + T_{то} = 0,000625 + 0,000333 =$$

$$= 0,000958 \text{ с} \quad \text{– эк-$$

вивалентная малая постоянная времени контура тока;

$$K_{т} = \frac{U_{3 \text{ т. макс}}}{I_{1g \text{ макс}}} = \frac{10}{0,244} = 43,46 \text{ В/А} \text{ – коэффициент}$$

обратной связи по току;

$U_{3 \text{ т. макс}}=10\text{В}$  – принятое максимальное значение напряжения задания на входе контура тока;

$$I_{1g \text{ макс}} = I_{1d \text{ макс}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{\text{ЭП макс}}^2 - I_0^2} =$$

$$= \sqrt{2} \cdot \sqrt{0,27^2 - 0,2077^2} = 0,244 \text{ А}$$

– максимально допустимое значение тока АД.

Максимальный ток ЭП соответствует требуемому моменту ЭП в пуско-тормозных режимах работы:

$$I_{\text{ЭП макс}} = \sqrt{\left(\frac{M_{\text{ЭП макс}}}{\sqrt{2} \psi_{2н} \cdot \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_m}{L_2}}\right)^2 + I_0^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0,52}{\sqrt{2} \cdot 0,7779 \cdot \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{2,6483}{3,0137}}\right)^2 + 0,2077^2} = 0,27 \text{ А} \quad (60)$$

Максимальный момент ЭП в пуско-тормозных режимах работы принимаем равным двукратному значению максимального момента нагрузки на валу двигателя и вычислим его из выше определенной мощности двигателя

$$M_{\text{ЭП макс}} = 2M_{с. макс} = 2 \cdot \frac{P_{д}}{\omega_{н}} =$$

$$= 2 \cdot \frac{36}{139,8} = 0,52 \text{ Н·м.} \quad (61)$$

Максимальное значение коэффициента усиления преобразователя частоты

$$K_{и} = \frac{\sqrt{2} U_{1н}}{U_{уп. макс}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,1, \quad (62)$$

где  $U_{уп. макс}=10$  В – принятое максимальное значение напряжения управления на входе преобразователя частоты;

$T_{рт}=T_3=0,002$  с – постоянная времени регулятора тока.

Передаточная функция замкнутого контура тока по управлению имеет следующий вид:

$$W_{зам.т}(p) = \left[\frac{1}{K_{т}}(T_{то} p + 1)\right] \times \left[a_{ит} T_{мг} T_{и} T_{то} p^3 + \right.$$

$$\left. + a_{ит} T_{мг}^2 p^2 + a_{ит} T_{мг} p + 1\right]^{-1} \approx \left[\frac{1}{K_{т}}(T_{то} p + 1)\right] \times$$

$$\times \left[a_{ит} T_{мг}^2 p^2 + a_{ит} T_{мг} p + 1\right]^{-1} \approx \left[\frac{1}{43,46}(3,33 \cdot$$

$$\cdot 3,33 \cdot 10^{-4} p + 1) \times [3,1362 \cdot 10^{-7} p^2 + 7,92 \cdot 10^{-4} p + 1]^{-1} \quad (63)$$

Настройка контура тока близка к настройке на МО системы 2-го порядка. Однако показатели качества работы оптимизированного контура тока по управлению зависят от отношения малых постоянных времени  $T_{и}$  и  $T_{ТО}$ . Поскольку контур тока является внутренним контуром, то для уменьшения перерегулирования в нем на входе контура устанавливают сглаживающий фильтр с передаточной функцией

$$W_{ф.вх}(p) = \frac{1}{T_{ф.вх} p + 1}, \quad (64)$$

постоянную времени которого из соображения компенсации, выбираем  $T_{ф.вх} = T_{ТО} = 0,000333$  с.

Тогда передаточная функция замкнутого оптимизированного контура тока с фильтром на входе имеет следующий вид:

$$W_{зам.т}(p) = \left[ \frac{1}{K_T} \right] \times [a_{ит} T_{ит} T_{ит} T_{ТО} p^3 + a_{ит} T_{ит}^2 p^2 + a_{ит} T_{ит} p + 1]^{-1} \approx \left[ \frac{1}{K_T} \right] \times [a_{ит} T_{ит}^2 p^2 + a_{ит} T_{ит} p + 1]^{-1} \approx [1/43,46] \times [3,13632 \cdot 10^{-7} p^2 + 7,92 \cdot 10^{-4} p + 1]. \quad (65)$$

Контур является астатической системой 1-го порядка по управлению.

### 6.2. Оптимизация контура потокосцепления

При оптимизации контура потокосцепления оптимизированный замкнутый контур тока представим усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W_{кт}(p) = \frac{1}{a_{ит} (T_{и} + T_{ТО}) p + 1} = \frac{1}{T_{мтз} p + 1}, \quad (66)$$

где  $T_{мтз} = a_{ит} (T_{и} + T_{ТО}) = 2 \cdot 0,000396 = 0,000792$  с – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока, с.

Контур потокосцепления характеризуется большой постоянной времени в прямом канале  $T_2 = 0,019$  с и с малыми постоянными времени в прямом канале  $T_{мтз} = 0,000792$  с и в цепи обратной связи  $T_{\psi 0} = 0,00267$  с.

В качестве регулятора потокосцепления принимаем ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{р\psi}(p) = K_{р\psi} \left( 1 + \frac{1}{T_{р\psi} p} \right) \quad (67)$$

и настраиваем контур потокосцепления на МО, где  $T_{\psi 0} = T_2 = 0,019$  с – постоянная времени регулятора потокосцепления;

$$K_{р\psi} = \frac{T_2 K_T}{a_{ит} T_{мтз} L_M K_{\psi}} = \frac{0,019 \cdot 43,46}{2 \cdot 0,0035 \cdot 2,6483 \cdot 12,86} = 3,46$$

– коэффициент передачи (усиления) регулятора потокосцепления;  $T_{мтз} = T_{мтз} + T_{\psi 0} = 0,000792 + 0,00267 = 0,0035$  с;

$$K_{\psi} = \frac{U_{3 \psi, макс}}{\psi_{2н}} = \frac{10}{0,7779} = 12,86 \text{ В/Вб} \text{ – коэффициент}$$

обратной связи по потокосцеплению;

$U_{3 \psi, макс} = 10$  В – максимальное значение напряжения задания на входе контура потокосцепления.

Передаточная функция замкнутого контура потокосцепления по управлению имеет следующий вид:

$$W_{зам.\psi}(p) = \left[ \frac{1}{K_{\psi}} (T_{\psi 0} p + 1) \right] \times [a_{ит} T_{мтз} T_{мтз} T_{\psi 0} p^3 + a_{ит} T_{мтз}^2 p^2 + a_{ит} T_{мтз} p + 1]^{-1} \approx \left[ \frac{1}{K_{\psi}} (T_{\psi 0} p + 1) \right] \times [a_{ит} T_{мтз}^2 p^2 + a_{ит} T_{мтз} p + 1]^{-1} \approx \left[ \frac{1}{12,86} (2,67 \cdot 10^{-3} p + 1) \right] \times [2 \cdot 10^{-4} p^2 + 7 \cdot 10^{-3} p + 1]^{-1}. \quad (68)$$

Настройка контура близка к настройке на МО системы 2-го порядка. Контур является астатической системой регулирования 1-го порядка по управлению и обеспечивает нулевую установившуюся ошибку по потоку.

### 6.3. Оптимизация контура скорости

Аналогично, как и при оптимизации контура потокосцепления, оптимизированный замкнутый контур тока представим усеченной передаточной функцией 1-го порядка.

В качестве регулятора скорости принимаем ПИ-регулятор скорости с передаточной функцией

$$W_{р\omega}(p) = K_{р\omega} \left( 1 + \frac{1}{T_{р\omega} p} \right), \quad (69)$$

где коэффициент усиления и постоянная времени регулятора скорости определяются по выражениям:

$$K_{р\omega} = \frac{4J_3 K_T}{a_{с\omega} \cdot T_{м\omega} \cdot K_c \cdot K_M} = \frac{4 \cdot 0,0001 \cdot 43,46}{8 \cdot 0,003462 \cdot 0,0715 \cdot 2,0506} = 4,28,$$

где  $J_3 = 1,5J_d = 1,5 \cdot 0,000029 = 0,0001$  кг·м<sup>2</sup> – эквивалентный момент инерции механической части ЭП (электродвигателя, редуктора и передачи винт-гайка);

$T_{mc} = T_{мгэ} + T_{co} = 0,000792 + 0,00267 = 0,003462$  с – суммарная малая постоянная времени контура скорости;

$$K_c = \frac{U_{3 \text{ с. макс}}}{\omega_H} = \frac{10}{139,8} = 0,0715 \text{ В} \cdot \text{с/рад} - \text{коэффициент обратной связи по скорости};$$

эфициент обратной связи по скорости;

$$K_M = -\frac{3}{2} K_2 p \Psi_{2d} = -\frac{3}{2} \cdot 0,8787 \cdot 2 \cdot 0,7779 = 2,0506 \text{ Вб}$$

– коэффициент момента АД;

$$\Psi_{2d} = \Psi_{2H};$$

$$K_2 = \frac{L_M}{L_2} = \frac{2,6483}{3,0137} = 0,8787;$$

$T_{pc} = 4T_{mc} = 4 \cdot 0,003462 = 0,01385$  с – постоянная времени регулятора скорости.

Передаточная функция замкнутого контура скорости по управлению для регулирования скорости

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{K_c} \cdot \frac{(4T_{mc} p + 1)(T_{co} p + 1)}{a_{cc} \cdot T_{mc}^2 T_{мгэ} T_{co} p^4 + a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2 + 4T_{mc} p + 1} \approx \frac{1}{K_c} \cdot \frac{(4T_{mc} p + 1)(T_{co} p + 1)}{a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2 + 4T_{mc} p + 1}. \quad (70)$$

Поскольку контур скорости является внутренним контуром для контура загрузки, то для уменьшения перерегулирования в нем на входе контура устанавливаем два сглаживающих фильтра с передаточными функциями вида

$$W_{\text{ф.вх}}(p) = \frac{1}{T_{\text{ф.вх}} p + 1} \quad (71)$$

и постоянными времени, соответственно, равными  $T_{\text{ф.вх1}} = 4T_{mc} = 4 \cdot 0,003462 = 0,01385$  с;  $T_{\text{ф.вх2}} = T_{co} = 0,00267$  с.

Тогда передаточная функция замкнутого контура скорости по управлению

$$W_{\text{зам.с}}(p) \approx \frac{1}{K_c} \cdot \frac{1}{a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2 + 4T_{mc} p + 1} \approx \frac{1}{7,15 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{1}{3,3192 \cdot 10^{-7} p^3 + 9,5884 \cdot 10^{-5} p^2 + 1,3848 \cdot 10^{-2} p + 1}.$$

Настройка контура с двумя фильтрами на входе близка к точной настройке на МО системы 3-го порядка. Контур скорости представляет собой астатическую систему 1-го порядка и обеспечивает точную обработку заданного значения скорости.

### 7. Оптимизация контура загрузки приводного АД вальцов

Структурная схема контура загрузки приводного АД вальцов приведена на рисунке 3.

В контуре загрузки присутствует инерционная обратная связь по току приводного АД вальцов.

При оптимизации контура загрузки внутренний оптимизированный замкнутый контур скорости с ПИ-регулятором скорости представлен усеченной передаточной функцией 3-го порядка.

$$W_{\text{зам.с}}(p) \approx \frac{1}{K_c} \cdot \frac{1}{a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2 + 4T_{mc} p + 1}, \quad (73)$$

при условии установки на входе контура скорости двух сглаживающих фильтров.

#### 7.1. Оптимизация контура загрузки с ПИ-регулятором

Передаточная функция ПИ-регулятора загрузки с коэффициентом усиления  $K_{pz}$  и фильтром на входе ( $T_3 \cdot p + 1$ )

$$W_{pz}(p) = (T_3 \cdot p + 1) \cdot K_{pz}, \quad (74)$$

где коэффициент усиления регулятора загрузки находится по выражению

$$K_{pz} = \frac{i_p}{2T_{тзо} K_{чразп} K_{пмп} K_{м.уд} K_{т/м} K_{тз}} = \frac{16}{2 \cdot 0,000333 \cdot 13,98 \cdot 0,0019 \cdot 333,33 \cdot 0,3 \cdot 0,345} = 26,2 \cdot 10^3,$$

$$\text{где } T_{тзо} = \frac{T_{ст}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,000333 \text{ с};$$

$$K_{чразп} = \frac{\omega_{\text{макс}}}{U_{p.3. \text{ макс}}} = \frac{139,8}{10} = 13,98 \frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{В}};$$

$$K_{пмп} = \frac{h_b}{2\pi} \cdot \frac{h_3}{h_{b-r}} = \frac{0,01}{2 \cdot 3,14} \cdot \frac{0,6}{0,4} = 0,0019 \frac{\text{м}}{\text{рад}};$$

$$K_{м.уд} = \frac{M_c}{L} = \frac{100}{0,3} = 333,33 \text{ Н};$$

$$K_{т/м} = \frac{I_H}{M_H} = \frac{29}{98} = 0,3 \text{ А/Н} \cdot \text{м};$$

$$K_{т.з} = \frac{U_{д. \text{ макс}}}{I_{д. \text{ макс}}} = \frac{10}{29} = 0,345 \text{ В/А};$$

$$i_p = \frac{\omega_d}{\omega_p} = \frac{139,8}{8,74} = 16 \text{ о.е.}$$

Тогда передаточная функция разомкнутого контура загрузки с учетом оптимизированного замкнутого контура скорости с ПИ-регулятором

$$W_{\text{раз.кз}}(p) = \frac{(T_3 p + 1) i_p}{2T_{\text{тз0}} K_{\text{чразп}} K_{\text{имп}} K_{\text{м.уд}} K_{\text{т/м}} K_{\text{тз}} K_c} \cdot \frac{1}{a_{\text{сс}} T_{\text{мс}}^3 p^3 + a_{\text{сс}} T_{\text{мс}}^2 p^2 + 4T_{\text{мс}} p + 1} \cdot \frac{1}{i_p p} \cdot K_{\text{имп}} \cdot K_{\text{м.уд}} \cdot \dots$$

$$\frac{K_{\text{т/м}}}{T_3 p + 1} \cdot \frac{K_{\text{тз}}}{T_{\text{тз0}} p + 1} = \frac{1}{K_c} \cdot \frac{1}{2T_{\text{тз0}} p K_{\text{чразп}} (a_{\text{сс}} T_{\text{мс}}^3 p^3 + a_{\text{сс}} T_{\text{мс}}^2 p^2 + 4T_{\text{мс}} p + 1)} \cdot \frac{1}{(T_{\text{тз0}} p + 1)} =$$

$$= \frac{1}{K_c K_{\text{чразп}} (16T_{\text{мс}}^3 T_{\text{тз0}}^2 p^5 + 16T_{\text{мс}}^2 T_{\text{тз0}} (T_{\text{тз0}} + T_{\text{мс}}) p^4 + 8T_{\text{мс}} T_{\text{тз0}} (T_{\text{тз0}} + 2T_{\text{мс}}) p^3 + 2T_{\text{тз0}} (T_{\text{тз0}} + 4T_{\text{мс}}) p^2 + 2T_{\text{тз0}} p) + 1} \quad (75)$$

Замкнутого контура по управлению

$$W_{\text{зам.кз}}(p) = \frac{1}{W_{\text{тз0}}(p)} \cdot \frac{W_{\text{раз.кз}}(p)}{1 + W_{\text{раз.кз}}(p)} = \frac{(T_{\text{тз0}} p + 1)}{K_{\text{тз}}}$$

$$\frac{1}{K_c K_{\text{чразп}} (16T_{\text{мс}}^3 T_{\text{тз0}}^2 p^5 + 16T_{\text{мс}}^2 T_{\text{тз0}} (T_{\text{тз0}} + T_{\text{мс}}) p^4 + 8T_{\text{мс}} T_{\text{тз0}} (T_{\text{тз0}} + 2T_{\text{мс}}) p^3 + 2T_{\text{тз0}} (T_{\text{тз0}} + 4T_{\text{мс}}) p^2 + 2T_{\text{тз0}} p) + 1} \approx$$

$$\approx \frac{1 / K_{\text{тз}} \cdot (T_{\text{тз0}} p + 1)}{K_c K_{\text{чразп}} (16T_{\text{мс}}^2 T_{\text{тз0}} (T_{\text{тз0}} + T_{\text{мс}}) p^4 + 8T_{\text{мс}} T_{\text{тз0}} (T_{\text{тз0}} + 2T_{\text{мс}}) p^3 + 2T_{\text{тз0}} (T_{\text{тз0}} + 4T_{\text{мс}}) p^2 + 2T_{\text{тз0}} p) + 1} \approx$$

$$\approx \frac{1 / 0,345 (3,33 \cdot 10^{-4} p + 1)}{2,4 \cdot 10^{-4} p^4 + 6,692 \cdot 10^{-8} p^3 + 9,445 \cdot 10^{-6} p^2 + 6,65 \cdot 10^{-4} p + 1} \quad (76)$$

Настройка контура с ПИ-регулятором и фильтром на входе близка к точной настройке на МО системы 4-го порядка. Контур является астатической системой регулирования 1-го порядка по управлению. Показатели качества работы замкнутого контура загрузки по управлению согласно [7, 8] определяются следующими значениями:

– статическая ошибка по току загрузки приводного двигателя валцов при постоянном значении задающего сигнала равна нулю;

– полоса пропускания контура загрузки по модулю и по фазе

$$\omega_n^{(M)} = \frac{0,532}{T_{\text{мс}}} = \frac{0,532}{0,003462} = 153,668 \text{ рад/с или } f_n^{(M)} = \frac{\omega_n^{(M)}}{2\pi} = \frac{153,668}{2 \cdot 3,14} = 24,469 \text{ Гц;}$$

$$\omega_n^{(\Phi)} \approx \frac{0,28}{T_{\text{мс}}} = \frac{0,28}{0,003462} = 80,878 \text{ рад/с или } f_n^{(\Phi)} = \frac{\omega_n^{(\Phi)}}{2\pi} = \frac{80,878}{2 \cdot 3,14} = 12,879 \text{ Гц;}$$

– перерегулирование, время первого и окончательного вхождения в 5%-ю зону при отработке скачка загрузки

$$\sigma = 53,52\%; t_{\text{пу1}}^{(5)} \approx 5,69 \cdot T_{\text{мс}} = 5,69 \cdot 0,003462 = 0,0197 \text{ с; } t_{\text{пу2}}^{(5)} \approx 18,2 \cdot T_{\text{мс}} = 18,2 \cdot 0,003462 = 0,063 \text{ с.}$$

### 7.2 Оптимизация контура загрузки с ПИ-регулятором

Передаточная функция ПИ-регулятора загрузки с коэффициентом усиления  $K_{\text{рз}}$  и постоянной времени регулятора  $T_{\text{рз}}$

$$W_{\text{рз}}(p) = \frac{((4T_{\text{тз0}} + T_3) \cdot p + 1) i_p}{8T_{\text{тз0}}^2 \cdot p K_{\text{чразп}} K_{\text{имп}} K_{\text{м.уд}} K_{\text{т/м}} K_{\text{тз}}}, \quad (77)$$

$$\text{где } K_{\text{рз}} = \frac{i_p (4T_{\text{тз0}} + T_3)}{8T_{\text{тз0}}^2 K_{\text{чразп}} K_{\text{имп}} K_{\text{м.уд}} K_{\text{т/м}} K_{\text{тз}}} = \frac{14(4 \cdot 0,000333 + 0,007)}{8 \cdot 0,000333^2 \cdot 13,98 \cdot 0,0019 \cdot 333,33 \cdot 0,3 \cdot 0,345} = 164 \cdot 10^4;$$

$$T_{\text{рз}} = 4T_{\text{тз0}} + T_3 = 4 \cdot 0,000333 + 0,007 = 0,0082 \text{ с;}$$

$T_3 = 0,007 \text{ с}$  – эквивалентная постоянная приводного АД валцов, с.

Тогда передаточная функция разомкнутого контура загрузки с учетом оптимизированного замкнутого контура скорости с ПИ-регулятором

$$W_{\text{раз.кз}}(p) = \frac{((4T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})p + 1)i_p}{8T_{\text{тзо}}^3 p K_{\text{чразп}} K_{\text{пмп}} K_{\text{м.уд}} K_{\text{т/м}} K_{\text{тз}} a_{\text{с}} T_{\text{мс}}^3 p^3 + a_{\text{с}} T_{\text{мс}}^2 p^2 + 4T_{\text{мс}} p + 1} \cdot \frac{1}{K_{\text{с}}} \cdot \frac{K_{\text{пмп}}}{i_p} \cdot K_{\text{м.уд}} \cdot \frac{K_{\text{т/м}}}{T_{\text{э}} p + 1} \cdot \frac{K_{\text{тз}}}{T_{\text{тзо}} p + 1} =$$

$$= \frac{(4T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})p + 1}{K_{\text{с}} K_{\text{чразп}} (64T_{\text{мс}}^3 T_{\text{тзо}}^2 p^6 + 64T_{\text{мс}}^2 T_{\text{тзо}}^2 p^4 + 32T_{\text{мс}} T_{\text{тзо}}^2 p^3 + 8T_{\text{тзо}}^2 p^2)(T_{\text{э}} p + 1)(T_{\text{тзо}} p + 1)} \quad (78)$$

Замкнутого контура по управлению

$$W_{\text{зам.кз}}(p) = \frac{1}{W_{\text{тзо}}(p)} \cdot \frac{W_{\text{раз.кз}}(p)}{1 + W_{\text{раз.кз}}(p)} = \frac{(T_{\text{тзо}} p + 1)}{K_{\text{тз}}} \cdot \frac{K_{\text{с}} K_{\text{чразп}} (64T_{\text{мс}}^3 T_{\text{тзо}}^2 p^5 + 64T_{\text{мс}}^2 T_{\text{тзо}}^2 p^4 + 32T_{\text{мс}} T_{\text{тзо}}^2 p^3 + 8T_{\text{тзо}}^2 p^2)(T_{\text{э}} p + 1)(T_{\text{тзо}} p + 1)}{1 + \frac{(4T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})p + 1}{K_{\text{с}} K_{\text{чразп}} (64T_{\text{мс}}^3 T_{\text{тзо}}^2 p^5 + 64T_{\text{мс}}^2 T_{\text{тзо}}^2 p^4 + 32T_{\text{мс}} T_{\text{тзо}}^2 p^3 + 8T_{\text{тзо}}^2 p^2)(T_{\text{э}} p + 1)(T_{\text{тзо}} p + 1)}} \approx$$

$$\approx \left[ 1/K_{\text{тз}} ((5T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})p + 1) \right] \cdot \left[ K_{\text{с}} K_{\text{чразп}} (64T_{\text{мс}}^2 T_{\text{тзо}}^2 (T_{\text{тзо}} T_{\text{э}} + T_{\text{мс}} (T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})) p^6 + 32T_{\text{мс}} T_{\text{тзо}}^2 (T_{\text{тзо}} T_{\text{э}} + 2T_{\text{мс}} (T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}}) + 2T_{\text{мс}}^2) p^5 + \right.$$

$$\left. + 8T_{\text{тзо}}^2 (T_{\text{тзо}} T_{\text{э}} + 4T_{\text{мс}} (T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}}) + 8T_{\text{мс}}^2) p^4 + 8T_{\text{тзо}}^2 ((T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}}) + 4T_{\text{мс}}) p^3 + 8T_{\text{тзо}}^2 p^2) + (4T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}}) p + 1 \right]^{-1} \approx$$

$$\approx \left[ 1/0,345 (8,665 \cdot 10^{-3} p + 1) \right] \cdot \left[ 2,15 \cdot 10^{-13} p^6 + 8 \cdot 10^{-11} p^5 + 1,6 \cdot 10^{-10} p^4 + 1,87 \cdot 10^{-8} p^3 + 8,87 \cdot 10^{-7} p^2 + 8,332 \cdot 10^{-3} p + 1 \right]^{-1} \quad (79)$$

Настройка контура загрузки с ПИ-регулятором близка к точной настройке на СО системы 6-го порядка. Замкнутый контур загрузки приводного АД валцов представляет собой астатическую систему 2-го порядка по управлению. Показатели качества работы замкнутого контура загрузки по управлению согласно [7, 8] определяются следующими значениями:

– статическая ошибка по току загрузки приводного двигателя валцов при постоянном значении задающего сигнала равна нулю;

– полоса пропускания контура загрузки по модулю и фазе:

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0,149}{T_{\text{мс}}} = \frac{0,149}{0,003462} = 43,039 \text{ рад/с или } f_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{м})}}{2\pi} = \frac{43,039}{2 \cdot 3,14} = 6,853 \text{ Гц;}$$

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0,096}{T_{\text{мс}}} = \frac{0,096}{0,003462} = 27,947 \text{ рад/с или } f_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})}}{2\pi} = \frac{27,947}{2 \cdot 3,14} = 4,45 \text{ Гц;}$$

– перерегулирование, время первого и окончательного вхождения в 5%-ю зону при отработке скачка загрузки

$$\sigma = 50,9\%; t_{\text{пу1}}^{(5)} \approx 21,8 \cdot T_{\text{мс}} = 21,8 \cdot 0,003462 = 0,0755 \text{ с; } t_{\text{пу2}}^{(5)} \approx 74,4 \cdot T_{\text{мс}} = 74,4 \cdot 0,003462 = 0,2576 \text{ с.}$$

### Заключение

1. Анализ показателей качества работы замкнутого контура загрузки по управлению с П- и ПИ-регуляторами показывает, что система загрузки с ПИ-регулятором обладает несколько меньшим перерегулированием, но значительно большими временами первого и окончательного вхождения в 5 %-ю зону регулирования тока загрузки, а также меньшей полосой пропускания контура загрузки в сравнении с П-регулятором. Следовательно, в контуре регулирования загрузки приводного АД валцов по условию быстродействия наиболее целесообразно использование П-регулятора, так как при этом перерегулирование тока загрузки будет менее чем на 3% превышать перерегулирование при использовании ПИ-регулятора.

2. Из расчетов очевидно, что мощность двигателя ИО, затрачиваемая на регулирование загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна с помощью

задвиги предложенной конструкции, значительно меньше мощности, затрачиваемой шнековыми и роторными регуляторами загрузки зерна.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дайнеко, В.А. К вопросу снижения энергоемкости процесса измельчения фуражного зерна / В.А. Дайнеко, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2008. – № 1. – С. 35-40.
2. Прищепова, Е.М. Оптимизация параметров настройки частотно-регулируемого асинхронного электропривода с бездатчиковым векторным управлением / Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2019. – № 6 (136). – С. 28-37.
3. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Де-

ментьев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

4. Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

5. Гусев, Н.В. Автоматизация технологических комплексов и систем в промышленности: учебное пособие по курсовому проектированию / Н.В. Гусев, С.В. Ляпушкин, М.В. Коваленко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 186 с.

6. Прищепов, М.А. Структурные схемы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для частотно-регулируемого электропривода со скалярным и векторным управлением / М.А. Прищепов, В.А. Дайнеко, Е.М. Прищепова // Известия Нацио-

нальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук. – 2019. – Том 57. – № 4. – С. 481–493.

7. Удут, Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 164 с.

8. Удут, Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. Оптимизация контура регулирования: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 156 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 06.04.2020

УДК 633.43

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ЗЕРНА ЯЧМЕНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**О.В. Бондарчук,**

*ст. преподаватель каф. электротехнологии БГАТУ*

*В статье описывается влияние электрического поля на переход влаги из связанного в свободное состояние в зерне пивоваренного ячменя.*

*Ключевые слова: напряженность, частота, электрическое поле, свободная влага, пивоваренный ячмень, солод.*

*The article describes the influence of electric field on moisture transfer from bound to free condition in brewing barley grain.*

*Keywords: voltage, frequency, electric field, free moisture, brewing barley, malt.*

### Введение

Согласно технологии [1], начальным процессом солодоращения является увеличение содержания свободной влаги в ячмене. Влага запускает последующие ферментативные процессы.

По мнению Гордеева А.М. и Шешнева В.В. [2], процесс выделения влаги протекает наиболее интенсивно при низких частотах.

Можно предположить, что наложение электрического поля данной частоты будет способствовать увеличению кинетической энергии связанных молекул воды в структуре зерна и их переход в свободное состояние.

Цель настоящей работы – описать механизм влияния электрического поля на переход связанной влаги в свободную в структуре зерна ячменя.

### Основная часть

Используя известные представления о влиянии электромагнитного поля на зерно как диэлектрик, примем следующие упрощения: зерно расположено между электродами, к которым приложено напряжение пере-

менного тока; зерно однородно по механическим и электрофизическим параметрам и может считаться изотропными сферами; перенос теплоты и влаги между зернами-сферами незначителен.

Исходя из этих предположений и принципов неравновесной термодинамики [3], определяющие уравнения тепловлагопереноса с учетом приложенного электрического поля можно представить в виде:

для локального влагосодержания  $M$ , кг/кг

$$\rho_s \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \rho_s D_v \frac{\partial M}{\partial r} \right) - m_{ev}; \quad (1)$$

для температуры сферического зерна  $T$ , К

$$\rho_s C_{Ps} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \right) - m_{ev} \Delta h + \Phi. \quad (2)$$

Поскольку изменение во времени плотности локальной влаги мало [4], то для интенсивности ее выделения справедливо соотношение:

$$m_{ev} = - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{D_v M_{H_2O}}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial r} \right), \quad (3)$$