

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики  
(інститут)

Електротехнічний факультет  
(факультет)

Кафедра електропривода  
(повна назва)

### ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

кваліфікаційної роботи ступеню \_\_\_\_\_ магістра \_\_\_\_\_  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента \_\_\_\_\_ Дерія Сергія Віталійовича \_\_\_\_\_  
(ПІБ)

академічної групи \_\_\_\_\_ 141М-17-4 \_\_\_\_\_  
(шифр)

спеціальності \_\_\_\_\_ 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка \_\_\_\_\_  
(код і назва спеціальності)

спеціалізації<sup>1</sup> \_\_\_\_\_

за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації та електропривод  
(офіційна назва)

на тему \_\_\_\_\_ Моделювання системи регулювання швидкості синхронного приводу  
потужних барабаних млинів \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (назва за наказом ректора)

Керівники кваліфікаційної роботи розділів:	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
Спеціальні розділи	Бородай В.А.			
Економічна частина	Тимошенко Л.В.			
Рецензент	Хілов В.С.			
Нормоконтролер	Казачковский М.М.			

Дніпро

2018

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**  
завідувач кафедри  
електропривода  
(повна назва)

\_\_\_\_\_ Казачковський М.М.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

« 12 » \_\_\_\_\_ 11 \_\_\_\_\_ 2018 \_\_\_\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**ступеня** \_\_\_\_\_  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту \_\_\_\_\_ Дерій С.В. \_\_\_\_\_ академічної групи \_\_\_\_\_ 141м-17-4 \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали) (шифр)  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

спеціалізації<sup>1</sup> \_\_\_\_\_  
за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації та електропривод  
(офіційна назва)

на тему \_\_\_\_\_ Моделювання системи регулювання швидкості синхронного приводу потужних  
\_\_\_\_\_ барабаних млинів

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від \_\_\_\_\_ 12.11.2018 р. \_\_\_\_\_ № 1913-л.

Розділ	Зміст	Термін виконання
Розділ 1.	Объект исследований и проблемы энерго- и ресурсосбережения. Предлагаемые методы ресурсосбережения.	15.10 – 28.11.18
Розділ 2.	Модель электромеханической системы привода	29.10 – 25.11.18
Розділ 3.	Моделирование системы	26.11 – 9.12.18
Розділ 4.	Техническо- экономическое обоснование	10.12 -16.12.18
Заключення	Формулювання висновків	15.12-18.12.18

Завдання видано \_\_\_\_\_ Бородай В.А. \_\_\_\_\_  
(підпис керівника) (прізвище, ініціали)

Дата видачі 15 жовтня 2018

Дата подання до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 26.12.2018 р. \_\_\_\_\_

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_ Дерій С.В. \_\_\_\_\_  
(підпис студента) (прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота загальним об'ємом 60 сторінок складається із вступу, 4 розділів та висновків, що містить 11 схем, 7 таблиць, 1 додаток.

У розділі «Об'єкт досліджувань та проблеми енерго- та ресурсозбереження. Пропоновані методи ресурсозбереження» наведено аналіз стану питання сучасного виробництва та обґрунтовано використання синхронного електроприводу подрібнювальних машин. Доведено, що задля енергозбереження на підприємствах вигідне використання синхронних двигунів, які регулюються. Тому рішення задачі, щодо використання керованого синхронного приводу є актуально.

У розділі «Модель електромеханічної системи привода» представлена математична модель синхронного двигуна, також був виконаний синтез системи керування частотного регулювання швидкості, представлені передаточні функції складових системи. Виходячи з цього, були розраховані параметри електромеханічної системи.

У розділі «Моделювання системи» міститься оригінальна модель синхронного двигуна для випадку з частотним регулюванням. Виконаний опис вирішених задач.

У розділі «Техніко-економічне обґрунтування» виконаний розрахунок економії проекту та аналіз показників економічності проекту.

ЕНЕРГОСБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, МЕХАНІЗМИ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ, ПОТУЖНИЙ СИНХРОНИЙ ПРИВОД, ОРИГІНАЛЬНА МОДЕЛЬ ДВИГУНА, СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКОСТІ

## РЕФЕРАТ

Дипломная работа общим объемом 60 страниц состоит из вступления, 4 разделов и выводов, который содержит 11 схем, 7 таблиц, 1 приложение.

В разделе «Объект исследований и проблемы энерго- и ресурсосбережения. Предлагаемые методы ресурсосбережения» приведен анализ вопроса современного производства и обоснование использования синхронного электропривода измельчительных машин. Доказано, что для энергосбережения на предприятиях выгодно использовать регулируемый синхронный двигатель. Поэтому задачи касательно регулируемого синхронного привода являются актуальными.

В разделе «Модель электромеханической системы привода» представлена математическая модель синхронного двигателя, так же была выполнен синтез системы управления частотного регулирования скорости, представлены передаточные функции составляющих системы. Исходя из этого были рассчитаны параметры электромеханической системы.

В разделе «Моделирование системы» представлена оригинальная модель синхронного двигателя для случая с частотным регулированием. Выполнено описание решенных задач работы.

В разделе «Технико – экономическое обоснование» выполнен расчет экономичности модели, а так же анализ показателей экономичности проекта.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ, МЕХАНИЗМЫ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, МОЩНЫЙ СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ОРИГИНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ, СИНТЕЗ СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТИ

## REPORT

Diploma work consists a general volume 66 pages of entry, 4 divisions and conclusions, that contains 11 charts, 7 tables,1 addition.

In a division "Object of researches and problem energy- and resource economy. Offered methods of resource economy" an analysis over of question of modern production and ground of the use of synchronous electromechanic of grinding down machines are brought. It is well-proven that for energy-savings on enterprises it is advantageous to use managed synchronous engine. Therefore tasks concerning the managed synchronous drive are actual.

In a division "Model of the electromechanics system of drive" is presented mathematical model of synchronous engine, similarly was the synthesis of control system of the frequency adjusting of speed is executed, the transmission functions of making the systems are presented. The parameters of the electromechanics system were expected on this basis In a division "Design of the system" the original model of synchronous engine is presented for a case with the frequency adjusting. Description of the decided tasks of work is executed.

In the division of "Technical is an economic ground" the calculation of model economy is executed, and similarly analysis of indexes of economy of project.

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES, MECHANISMS OF MINING  
METALLURGICAL INDUSTRY, POWERFUL SYNCHRONOUS  
ELECTROMECHANIC, ORIGINAL MODEL OF ENGINE, SYNTHESIS  
SYSTEM MANagements SPEEDS

Содержание	Стр.
Введение.....	7
1. Объект исследований и проблемы энерго- и ресурсосбережения.	
Предлагаемые методы ресурсосбережения .....	11
1.1. Скоростной способ повышения эффективности измельчения....	11
1.2. Энергосбережение средствами электропривода.....	19
1.3. Энергосбережения средствами частотного преобразователя...	22
Выводы.....	23
2. Модель электромеханической системы привода.....	24
2.1. Теоретическая проработка модели синхронного двигателя.....	24
2.2. Синтез системы управления скорости.....	29
2.3. Исходные данные. Методика определения параметров системы.....	31
Выводы.....	39
3. Моделирование системы.....	40
3.1. Разработка модели электромеханической системы.....	40
3.2. Анализ результатов исследование системы.....	44
Выводы.....	44
4. Техничко – экономическое обоснование.....	46
Введение.....	46
4.1 Капитальные затраты на приобретение и монтаж тяжелого СД весом в 15 тонн.....	47
4.2 Расчет эксплуатационных расходов .....	51
4.3 Определение годовой экономии от внедрения проекта.....	55
4.4 Определение и анализ показателей экономической эффективности проекта.....	56
Выводы.....	57
Заключение.....	58
Приложение.....	59
Литература.....	66

## **Введение**

### ***Актуальность темы***

Существующая тенденция к увеличению стоимости энергоресурсов в Украине ставит производственные предприятия перед выбором внедрение энергосберегающих технологий, либо закрытие производства из-за низкой конкурентоспособности, выпускаемой продукции. Среди возможных способов реализации энергосбережения - использования синхронных двигателей в качестве электропривода производственных механизмов горно-металлургической промышленности. Одним из направлений повышения эффективности барабанных мельниц является усовершенствование технологии измельчения, а так же использование более современных систем их электропривода.

С точки зрения энергетики, измельчение трением является наиболее затратным процессом, далее идет комбинированный, а последним в этом ряду есть ударный способ измельчения. Повысить эффективность работы мельницы – значит создать условия при, которых минимум энергозатрат на измельчения исходного сырья обеспечит максимум производительности. Исходя из этого, очевидно, что необходимо регулировать соотношение режимов работы мельницы, которые зависят от скорости вращения барабана.

Второй способ повышения эффективности измельчительных машин – это включение в состав механизмов такого класса привода с лучшими энергетическими показателями. К таким показателям относятся синхронные машины, которые обладают повышенным значением КПД, возможностью компенсации реактивной мощности, существенным воздушным зазором, позволяющим уменьшить требования к точности изготовления и низкая частота вращения выходного вала, не требующая установления промежуточного редуктора и соответственно увеличивающие надежность электромеханической системы в целом.

Традиционно синхронный привод барабанных мельниц настраивают на рациональную скорость вращения для условий измельчения полезный ископаемых конкретного месторождения. Как следствие это не предполагает регулирование скорости, на протяжении всего срока работы не смотря на изменения особенностей входного продукта, которые имеют место в разных зонах добычи.

Принимая во внимание экономические вызовы и требования к эффективности мельниц актуальность создания систем автоматического управления скорости синхронного привода барабанных мельниц не может вызывать сомнение.

### ***Цель и задачи исследований***

Основная цель исследований – разработка автоматической системы регулирования скорости, которая позволяет создать условия для повышения энергетической эффективности измельчения горнорудного оборудования.

### ***Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:***

- выбрать и обосновать перспективные направления усовершенствования синхронного привода;
- определить структуру и параметры системы регулирования скорости синхронного привода мощных барабанных мельниц;
- исследовать и показать принципиальную возможность применения системы регулирования скорости синхронного привода мощных барабанных мельниц.

### ***Методы исследования***

Для решения поставленных задач использовались теоретические методы исследования, базирующиеся на фундаментальных положениях теории электрических машин, теории электропривода, методы математического и компьютерного моделирования.

**Объектом исследований** в работе являются электромагнитные переходные процессы в мощных синхронных приводах барабанных мельниц.

**Предметом исследования** являются система регулирования скорости обработки технологической задачи при обогащении полезных ископаемых.

***Научные положения и результаты, выносимые на защиту:***

– структурная схема системы автоматического регулирования скорости синхронного привода, базирующаяся на оригинальной модели синхронного двигателя и разработана для случаев частотного управления, позволяет применение классических методов синтеза регуляторов системы управления.

***Научная новизна работы:***

Разработана автоматическая система регулирования скорости синхронного привода, в отличии от других, базируется на оригинальной модели двигателя, построенная для случаев частотного управления.

***Отличием от результатов, полученных другими авторами,*** есть применение оригинальной модели синхронного двигателя и подтверждение принципиальной возможности использования классических методов определения параметров регуляторов системы управления.

***Практическое значение работы*** заключается в следующем:

Получена новая автоматизированная электромеханическая система, которая позволит повысить энерго- и ресурсосбережение, производительность оборудования, и как следствие, конкурентоспособность промышленного производства.

***Основное содержание работы***

Первая глава посвящена анализу проблем энергосбережения и основным задачам, которые возникают в современном производстве при использовании синхронных электроприводов для измельчительных машин, способам улучшения пусковых свойств мощных синхронных двигателей, так же рассмотрению способов измельчения.

В ходе исследования определили технологическую эффективность измельчительного оборудования, которая возможна при применении регулируемого привода, что обеспечивается за счет непрерывного подбора скоростного режима, это создает условия для максимальной производительности.

Во второй главе была выполнена теоретическая проработка синхронного двигателя, так же синтез системы управления скоростью данного двигателя. Представлен расчет передаточных функций контуров тока и скорости, определения типов регуляторов данной системы.

В третьей главе представлена модель синхронного привода в среде Matlab (Simulink). В результате моделирования получены графики скорости данного двигателя.

### ***Ключевые слова***

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ, МЕХАНИЗМЫ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, МОЩНЫЙ СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ОРИГИНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ, СИНТЕЗ СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТИ

## ГЛАВА 1

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕТОДЫ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

#### 1.1. Скоростной способ повышения эффективности измельчения

Проблема энергосбережения достаточно актуальная на сегодняшний день. Одним из решений данной проблемы является модернизация технологического оборудования и его привода. В работе будут показаны преимущества регулируемого привода, на примере железорудных измельчительных установок, применяющих более эффективные способы измельчения, и обосновано, что именно такой способ есть наиболее экономичный и результативный.

Измельчением называют механический процесс деления, обрабатываемого сырья на части с целью лучшего его технологического использования [1]. Различают механические разрушения в результате раскалывания, истирания, раздавливания, удара, излома и среза (рис.1.1).

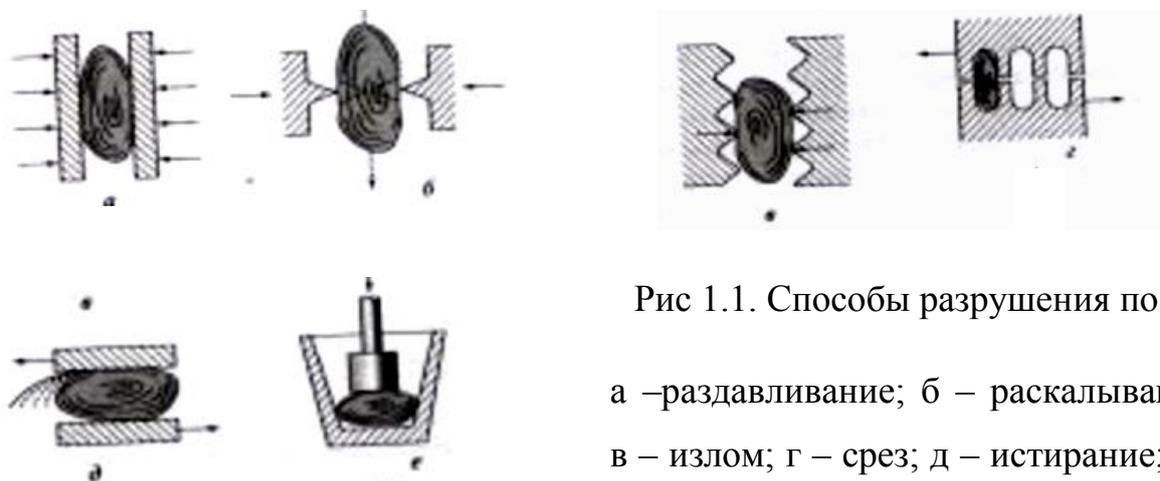


Рис 1.1. Способы разрушения по [1]:

а – раздавливание; б – раскалывание;  
в – излом; г – срез; д – истирание; е –  
разрушение ударом

Раздавливание наступает, когда прочность материала переходит за предел прочности, а раскалывание происходит за счет предела напряжения при растяжении. Излом возникает при изгибе, а срез - при сдвиге. При истирании, за счет трения частиц, происходит дробление материала на более мелкие

частицы. Ударное разрушение происходит вследствие динамических нагрузок.

Известен ряд гипотез разрушения. По Кирпичеву-Кику при деформациях сжатия, растяжения и изгиба определяющими являются нормальные напряжения, а работа  $\Delta A$  деформации одного куска пропорциональна изменению его первоначального объема  $V$ , то есть

$$\Delta A = K_k \cdot \delta \cdot V = K_k \cdot \Delta(D)^3, \quad (1.1)$$

где  $D$ - диаметр исходного куска.

По Риттингеру, если энергия затрачивается на деформацию сдвига за счет касательных напряжений, то элементарная работа пропорциональна увеличению поверхности:

$$\Delta A = K_R \cdot \Delta S = K_R \cdot \Delta(D)^2 \quad (1.2)$$

Академик П.А. Ребиндер предложил определять элементарную работу дробления куска по уравнению

$$\Delta A = K_k \cdot V + K_R \cdot \Delta S, \quad (1.3)$$

А Бонд - по среднему геометрическому приращению объема и поверхности:

$$\Delta A = K_B \cdot \Delta(\sqrt{V \cdot S}) = K_B \cdot \Delta(D^{2.5}). \quad (1.4)$$

Формула Кирпичева-Кика результативна в при крупном дроблении, а Бонда – при бреднем, потому для определения работы при измельчении В.А. Олевский предложил использовать формулу :

$$E_Q \cdot l g \cdot \frac{c}{E_Q} = \frac{1}{K_0}, \quad (1.5)$$

где  $E_Q$  - удельный расход электроэнергии, (кВт\*ч)/т;  $\Delta S$  - прирост удельной поверхности, см<sup>2</sup>/г;  $C, K_0$  – константы для конкретного материала.

Формула Олевского рассматривается как обобщение формулы Риттингера. По гипотезе В.И. Кармазина процесс дробления можно представить как постоянное сжатие куска диаметром  $D_0$  до куска размером  $D$ , что способствует увеличению площади поперечного сечения от  $F_0$  до  $F$ . Расчет затрат энергии определяется по формуле

$$E = K \cdot \frac{\left(\frac{D_0}{DK}\right)^n - 1}{n}, \quad (1.6)$$

где  $K$ - коэффициент пропорциональности;  $n$ -показатель, определяемый крупностью и физическими свойствами конкретного материала.

При  $n=0$  зависимость переходит в формулу Кирпичева –Кика,  $n=1$  – в формулу Риттингера, а при  $n=0.5$  – Бонда.

Важным параметром определяющим механический режим мельницы является угловая частота вращения барабана  $\omega$ . Другим важным параметром является коэффициент заполнения барабана:

$$\varphi = \frac{V_{из}}{V}, \quad (1.7)$$

где  $V_{из}$  – объем загрузки мельницы, м<sup>3</sup>;  $V$ - рабочий объем барабана, м.

Различают следующие скоростные режимы барабанных мельниц:

- каскадный режим, с перекачиванием мелющих тел без их полета;
- смешанный, частично с перекачиванием и полетом тел;
- водопадный режим, преимущественно с полетом тел.

Для мельниц с каскадным скоростным режимом работы после пуска внутримельничная загрузка поворачивается на предельный угол, близкий к

углу откоса (рис.1.2). При этом компоненты загруженного барабана приходят в движение по замкнутой траектории. Этот режим характерен для работы стержневой мельницы.

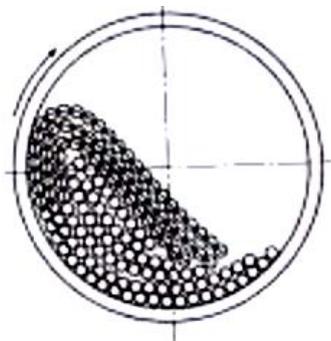


Рис. 1.2. Контур загрузки при каскадном режиме

В смешанном режиме (рис.1.3) часть загрузки имеет траекторию как свободного полета так и траекторию каскадного режима.

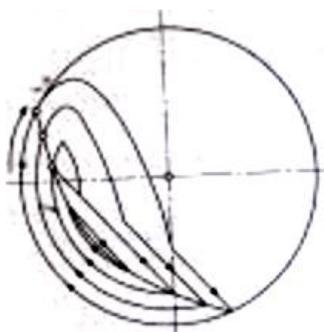


Рис.1.3. Контур загрузки при смешанном режиме

Режим работы внутризмельничной загрузки с преимущественно свободным полетом называется водопадным (рис.1.4). В этом режиме после

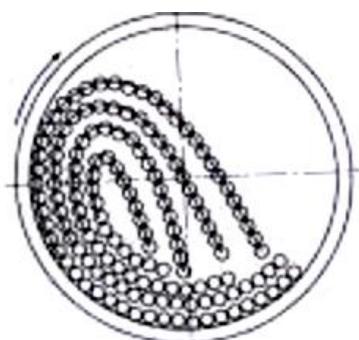


Рис. 1.4. Контур загрузки при водопадном режиме

подъема частиц на определенную высоту они падают со скоростью свободного падения по параболической траектории. Измельчение происходит ударом, что улучшает эффективность измельчения породы.

При отсутствии скольжения загрузки по внутренней поверхности барабана и его сверхкритической частоты вращения часть загрузки центрифугирует, а остальная в водопадном режиме.

При повышенных частотах вращения барабана и отсутствии скольжения загрузки относительно футеровки и ее частицы движутся вместе по кругу, то есть переходят в режим махового колеса. При этом измельчение материала отсутствует.

При известных  $\psi$  и  $\varphi$  скоростной режим внутримельничной загрузки барабана предварительно можно определить при помощи «зональной диаграммы» (рис.1.5). Центральная зона этой диаграммы ограничена криволинейным треугольником MNK для шаровых мельниц или M1N1K1- для стержневых. Данная диаграмма позволяет установить скоростной режим загрузки для определенного типа мельницы.

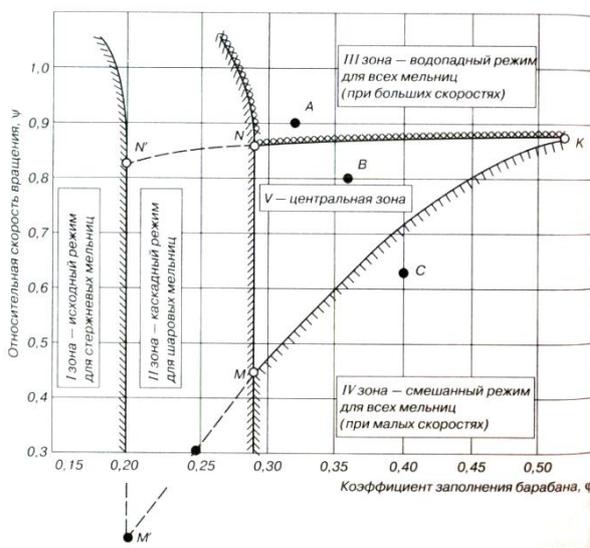


Рис.1.5. Зональная диаграмма режимов

### Мощность при каскадном режиме

Полезной мощностью шаровой мельницы принято считать мощность, которая нужна для приведения в движение загрузки барабана. При этом понимают, что загрузка представляет собой тело с центром тяжести в точке S. В установленном режиме вращения она поворачивается на угол  $\theta$ . При коэффициенте заполнения барабана  $\varphi$  плечо для линии действия силы будет определяться из выражения  $\Delta\Omega$ :

$$l = \frac{2 \cdot R \cdot \sin^3 \frac{\Omega}{2}}{3 \cdot \pi \cdot \varphi} \cdot \sin \theta, \quad (1.8)$$

Сила тяжести сегмента загрузки равна

$$G = g \cdot \pi \cdot \varphi \cdot R^2 \cdot L \cdot \gamma, \quad (1.9)$$

Насыпная плотность загрузки  $\gamma$  зависит от объема пустот, плотности дробящей среды и пульпы. Например, для смеси разноразмерных, беспорядочно уложенных стальных шаров или рудной гальки объем пустот составляет 38 - 40%, для стержней – 20%.

Объемная масса шаров в среднем составляет 4600 кг/м<sup>3</sup>. Для стержней ее принимают равной 6250 кг/м<sup>3</sup>. Плотность пульпы в мельнице определяется из выражения

$$\Delta = \frac{\delta_p}{\delta_p - p \cdot (\delta_p - 1)}, \quad (1.10)$$

где  $\delta_p$  - плотность измельчаемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  - содержание твердого в пульпе по массе (обычно для шаровых и стержневых мельниц  $p=0,8$ ).

Объемную массу загрузки с учетом заполнения пустот дробящей среды для различных мельниц обычно принимают равной

$$\gamma_{ш.н.} = 4600 + 0,4 \cdot \Delta \text{ – шаровые ;}$$

$$\gamma_{с.н.} = 6250 + 0,2 \cdot \Delta \text{ – стержневые ;} \quad (1.11)$$

$$\gamma_{р.н.} = 0,6 \cdot \delta_p + 0,4 \cdot \Delta \text{ – рудно - галечные.}$$

При полусамоизмельчении эта величина определяется из следующего выражения :

$$\gamma_{\text{ш.н.}} = \frac{\varphi_{\text{ш}}}{\varphi} 4600 + 0,6 \cdot \frac{\varphi - \varphi_{\text{ш}}}{\varphi} \cdot \delta_p + 0,4 \cdot \Delta, \quad (1.12)$$

где  $\varphi_{\text{ш}}$  - заполнения барабана шарами.

При постоянных частоте вращения и заполнения мелющей средой мощность внутримельчительной загрузки практически не зависит от производительности по измельчаемому материалу. В то же время она увеличивается при износе футеровки барабана. Для мельниц различных габаритов при одинаковом заполнении барабана и частоте его вращения углы  $\Theta$  и  $\Omega$  загрузки остаются постоянными. Исходя из этого, получаем формулу:

$$N_0 = k_0 \cdot D^{2,5} \cdot L, \quad (1.13)$$

Следовательно, что полезная мощность мельницы пропорциональна длине барабана  $L$  и его диаметру  $D$  в степени 2,5.

Водопадный режим движения мелющих тел в мельнице осуществляется при частоте вращения барабана, обеспечивающей переход всех или большинства слоев помольных шаров с круговой на параболическую траекторию. При таком режиме, помольные шары поднимаются по круговым траекториям, в определенных точках отклоняются от круговой траектории и совершают свободный полет по параболическим кривым. В точках падения мелющие шары снова переходят на круговую траекторию соответствующего слоя. Измельчение в шаровых мельницах с водопадным режимом происходит преимущественно за счет удара падающих шаров и частично за счет истирания и раздавливания. Этот режим широко используется и является единственным при измельчении трудно измельчаемых материалов.

Вес мелющих частиц должен быть достаточен для того, чтобы они могли измельчать наибольшие куски измельчаемого материала. Для эффективной работы шаровой мельницы необходимо соблюдать правильное соотношение

между величиной шаров и размерами загружаемого в мельницу материала. Если в измельчаемом материале достаточно много больших кусков, что не размалываются, это приведет к постепенному их накапливанию между шарами и, наконец, приостановит работу мельницы. В этих случаях необходимо уменьшить размер измельчаемого материала или увеличить размеры шаров, но в последнем случае уменьшается рабочая поверхность мельницы, что ведет к понижению ее производительности. Важно также следить за степенью заполнения барабана шарами, т.к. при слишком большом заполнении, поднимающиеся шары сталкиваются с падающими.

Влияние конструкции мельниц и формы футеровки на их производительность установлено на основании практических данных. Мельницы, работающие с низким уровнем пульпы, имеют производительность несколько большую, чем мельницы с высоким уровнем пульпы. В частности, производительность шаровых мельниц с решеткой приблизительно на 15 % больше производительности мельниц с центральной разгрузкой. Производительность мельниц с гладкой футеровкой меньше, чем мельниц с ребристой футеровкой. Производительность мельницы зависит также от других факторов: числа оборотов барабана, тонкости размола, влажности и крупности измельчаемого материала, своевременности удаления готового продукта.

Шаровые мельницы отличаются большим расходом энергии; при работе мельницы вхолостую, т.е. заполненной только шарами, расход энергии приблизительно равен расходу энергии при работе мельницы с полной загрузкой, т. е. при измельчении материала. Поэтому работа мельницы с неполной нагрузкой весьма невыгодна. Расход энергии для шаровых мельниц является функцией многих факторов: физических свойств измельчаемого материала, в первую очередь его удельного веса и твердости; степени заполнения барабана мельницы измельчающими шарами; числа оборотов барабана и др. Шаровые мельницы имеют невысокий КПД - не более 15%. Энергия в основном расходуется на износ шаров и корпуса мельницы, трение;

нагрев материала и т. п.

Достоинствами шаровых мельниц кроме большой единичной мощности, достижения тонкости помола, соответствующей удельной поверхности 5000 см<sup>2</sup>/г, простоты конструкции, высокой надежности, является также хорошо разработанное научное обоснование.

К недостаткам шаровых мельниц относятся их значительные металлоемкость и износ мелющих тел, а также сильный шум. Большая часть энергии при работе шаровой мельницы теряется бесполезно, что и приводит к низкому коэффициенту полезного действия. Но даже значительный удельный расход электроэнергии на измельчение материала окупается полезным эффектом при использовании мельницы. Это не исключает поиска решений по экономии электроэнергии при помоле, чем и занимаются специалисты со всего мира.

## **1.2. Энергосбережение средствами электропривода**

Электроприводами потребляется более 60% производимой в мире электроэнергии, поэтому вопросы энергосбережения имеют чрезвычайно важное значение. Для нас это тем более важно, поскольку стоимость электроэнергии возрастает и при неэкономичных системах электроприводов производственные расходы возрастают, соответственно возрастает стоимость вырабатываемой технологическими комплексами продукции. Установленные стандартами показатели качества электроэнергии делают необходимым при выборе систем электроприводов, особенно при большой их установленной мощности, рассмотрение всей электротехнической цепи от КТП (комплектная трансформаторная подстанция), где осуществляется контроль потребляемой активной и реактивной мощности и качества электроэнергии, до исполнительных органов рабочих и транспортных машин. Следует оптимально осуществлять набор силовых модулей (трансформаторов, реакторов, фильтров, полупроводниковых преобразователей, тормозных средств), при которых обеспечиваются минимальные потери электроэнергии, не нарушаются

показатели качества электроэнергии у источника питания и решаются все задачи технологии.

К основным методам сбережения электроэнергии в автоматизированных электроприводах технологических агрегатов и комплексов относятся следующие:

1. Применение вместо нерегулируемых электроприводов регулируемых, с помощью которых возможно при изменении режимов работы технологического оборудования и физико-механических свойств обрабатываемого вещества, устанавливать оптимальные по энергетическим затратам условия обработки вещества, например, оптимальные скорости насосов расхода и свойств жидкости, роторов дробилок, размеров и свойств дробимых веществ. Переход на регулирование давления и расхода воды насосных агрегатов с помощью регулируемых электроприводов, взамен дроссельного регулирования, приводит к исключению потерь напора и экономии электроэнергии, примерно на 30 %. Анализ требуемого изменения частоты агрегата при изменении расхода в сети показывает, что с уменьшением расхода требуется снижение частоты вращения. Если рассмотреть работу агрегата для расхода меньше номинального, то для этих режимов рационально работать с пониженной частотой вращения. В этом случае КПД агрегата выше, чем при работе с номинальной частотой вращения.

2. Применение силовых модулей регулируемых электроприводов, имеющих максимальные коэффициенты полезного действия и мощности (главными среди них являются электродвигатели, управляемые полупроводниковые преобразователи — выпрямители и инверторы, тормозные модули, обеспечивающие рекуперацию электроэнергии от двигателя в сеть переменного или постоянного напряжения); максимально возможное исключение потерь электроэнергии при использовании тормозных резисторов.

3. Исключение режимов пуска и торможения технологических агрегатов и комплексов в результате применения дополнительных механизмов с регулируемыми электроприводами, обеспечивающих совмещение движений основных механизмов в технологическом процессе для перевода их в

непрерывные режимы работы.

Повышения экономичности массового нерегулируемого электропривода посредством перехода на энергосберегающие двигатели и двигатели улучшенной конструкции, специально предназначенные для работы с регулируемым электроприводом.

В энергосберегающих двигателях за счет увеличения массы активных материалов (железа и меди) повышены номинальные значения КПД и  $\cos\phi$ . Энергосберегающие двигатели дают эффект при постоянной нагрузке. Целесообразность применения энергосберегающих двигателей должна оцениваться с учетом дополнительных затрат, поскольку небольшое (до 5 %) повышение номинальных КПД и  $\cos\phi$  достигается за счет увеличения массы железа на 30–35 %, меди на 20–25 %, алюминия на 10–15 %.

Ожидается изменение методик проектирования двигателей, отвечающих их применению в составе именно регулируемого электропривода. Прежде всего это касается асинхронного двигателя, для которого отказ от традиционных требований фиксированных амплитуды и частоты питающей сети, прямого включения в питающую сеть, обеспечения заданной перегрузочной способности приводит к существенному изменению конструкции и резкому улучшению характеристик. Можно отметить выпуск серии асинхронных двигателей, спроектированных фирмой «Schneider» для общепромышленных электроприводов. Изменяется методика проектирования и других типов двигателей, расширяется их номенклатура. По-видимому, следует ожидать резкого, взрывного улучшения характеристик по-новому спроектированных двигателей для регулируемого электропривода и соответствующую корректировку требований к системам управления. Так, прогнозируется рост частоты питания двигателей в регулируемом электроприводе до 500–1000 Гц и выше и снижение индуктивностей обмоток. Наблюдается рост выпуска электропривода с синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов (так называемый бесконтактный ВД постоянного тока). Эти двигатели имеют наилучшие массогабаритные показатели.

Перспективным является также синхронно-реактивный двигатель, который по прогнозам обладает массогабаритными показателями, лежащими в промежутке между соответствующими рекордными значениями синхронного двигателя и асинхронного двигателя, а по энергетической эффективности, возможно, превосходит их, причем при более низкой стоимости. Реактивные ВД упрощают схемы коммутаторов и якорных обмоток. При оптимизации угла опережения инвертора можно добиться увеличения момента и КПД привода. Существует оптимальный угол опережения в зависимости от частоты вращения. Увеличение КПД достигается также за счет соответствующего укорачивания шага обмотки.

### **1.3 Энергосбережение средствами частотного преобразователя**

Основным назначением частотно-регулируемого привода является бесступенчатое регулирование частоты вращения вала электродвигателя. Частотный привод позволяет реализовывать достаточно сложные алгоритмы управления электродвигателями, осуществлять защиту двигателя, регулировать КПД, оптимизировать режимы работы в зависимости от нагрузки и выполнять другие функции. Применение частотно-регулируемого привода является перспективным и экономически обоснованным направлением замены приводов. Преобразователь частоты представляет собой электронное статическое устройство. На выходе преобразователя формируется электрическое напряжение с переменными амплитудой и частотой. Название «частотно регулируемый электропривод» обусловлено тем, что регулирование скорости вращения двигателя осуществляется изменением частоты напряжения питания, подаваемого на двигатель от преобразователя частоты. Использование в статических преобразователях частоты новых полупроводников и диэлектриков, работающих в условиях повышенных температур, также способствует минимизации потерь в электроприводе и повышению его КПД.

Эффективным средством снижения потерь энергии при пуске двигателей является пуск при постепенном повышении напряжения, подводимого к

обмотке статора. Такой энергосберегающий способ пуска двигателя возможен только при работе этого двигателя в системе с регулируемым преобразователем: для асинхронных двигателей это устройства плавного пуска или преобразователи частоты, а для двигателей постоянного тока это электронные (тиристорные) устройства управления.

Тиристорный регулятор напряжения (ТРН) включается между сетью и асинхронным двигателем и изменяет напряжение на двигателе при изменении нагрузки таким образом, чтобы оптимизировать какой-либо энергетический показатель – потери, потребляемую мощность,  $\cos\varphi$  и т.д.

Снижение напряжения на зажимах синхронного двигателя при пуске уменьшает воздействие на сеть, механическую часть двигателя и исполнительного механизма. Электропривод с регулированием по напряжению прост, надежен в эксплуатации, имеет низкие массогабаритные показатели, удобен и пользуется спросом потребителей.

## **ВЫВОДЫ**

1. Технологическая эффективность измельчительного оборудования возможна при применении регулируемого привода, которая обеспечивается за счет непрерывного подбора скоростного режима, что создает условия для максимальной производительности.
2. Одним из направлений уменьшения энергоемкости измельчительного оборудования есть применение в его составе электропривода с высоким значением КПД. Наиболее перспективным, в этом отношении считается привод, построенный на базе синхронных двигателей.
3. Дополнительный канал энергосбережения в системе электрооборудования барабанных мельниц это применение частотных преобразователей с управлением, построенным на базе закона минимума, потребляемого тока якоря.

## ГЛАВА 2

### МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИВОДА

#### 2.1. Теоретическая проработка модели синхронного двигателя

Существующие модели синхронного двигателя, к сожалению, мало приспособлены к разработке систем регулирования, построенных на базе частотного управления. Поэтому выполним разработку модели, которая позволит выполнить синтез регуляторов при использовании классических методов теории автоматического управления. Для этого воспользуемся уравнениями баланса напряжений в относительных единицах (о.е.) с полным набором роторных обмоток:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = i_d \cdot r_s^* + p \cdot \psi_d - (1 - S) \cdot \psi_q \\ U_q^* = i_q \cdot r_s^* + p \cdot \psi_q^* + (1 - S) \cdot \psi_d \\ U_f^* = i_f \cdot r_f^* + p \cdot \psi_f^* \\ 0 = i_{kd} \cdot r_{kd}^* + p \cdot \psi_{kd}^* \\ 0 = i_{kq} \cdot r_{kq}^* + p \cdot \psi_{kq}^* \end{array} \right. , \quad (2.1)$$

где потокосцепления синхронной машины:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_d^* = x_d^* \cdot i_d^* + x_{ad}^* \cdot i_f^* + x_{ad}^* \cdot i_{kd}^* \\ \psi_q^* = x_q^* \cdot i_q^* + x_{aq}^* \cdot i_{kq}^* \\ \psi_f^* = x_{ad}^* \cdot i_d^* + x_f^* \cdot i_f^* + x_{ad}^* \cdot i_{kd}^* \\ \psi_{kd}^* = x_{ad}^* \cdot i_d^* + x_{ad}^* \cdot i_f^* + x_{kd}^* \cdot i_{kd}^* \\ \psi_{kq}^* = x_{aq}^* \cdot i_q^* + x_{kq}^* \cdot i_{kq}^* \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Выполним определение тока демферной обмотки по оси  $d$  пользуясь уравнениями потокосцеплений (2.2):

$$\psi_{kd}^* = x_{ad}^* \cdot i_d^* + x_{ad}^* \cdot i_f^* + x_{kd}^* \cdot i_{kd}^*$$

$$i_{kd}^* = \frac{\psi_{kd}^*}{x_{kd}^*} - \frac{x_{ad}^*}{x_{kd}^*} \cdot i_d^* + \frac{x_{ad}^*}{x_{kd}^*} \cdot i_f \quad (2.3)$$

где

$$k_1 = \frac{1}{x_{kd}^*}; \quad k_2 = \frac{x_{ad}^*}{x_{kd}^*}.$$

В результате замены переменных получаем

$$i_{kd}^* = k_1 \cdot \psi_{kd}^* - k_2 \cdot [i_d^* + i_f^*] \quad (2.4)$$

Пользуясь потокосцеплением обмотки возбуждения по оси  $d$

$$\psi_f^* = x_{ad}^* \cdot i_d^* + x_f^* \cdot i_f^* + x_{ad}^* \cdot [k_1 \cdot \psi_{kd}^* - k_2 \cdot (i_d^* + i_f^*)]$$

$$\psi_f^* = i_d^* \cdot (x_{ad}^* - x_{ad}^* \cdot k_2) + i_f^* \cdot (x_f^* - x_{ad}^* \cdot k_2) + x_{ad}^* \cdot k_1 \cdot \psi_{kd}^*, \text{ где}$$

$$k_3 = x_{ad}^* - x_{ad}^* \cdot k_2; \quad k_4 = x_f^* - x_{ad}^* \cdot k_2; \quad k_5 = x_{ad}^* \cdot k_1$$

$$\psi_f^* = k_3 \cdot i_d^* + k_4 \cdot i_f^* + k_5 \cdot \psi_{kd}^* \quad (2.5)$$

получим уравнение для тока обмотки возбуждения

$$i_f^* = \frac{\psi_f^*}{k_4} - \frac{k_3}{k_4} \cdot i_d^* - \frac{k_5}{k_4} \cdot \psi_{kd}^*,$$

где

$$k_6 = \frac{1}{k_4}; \quad k_7 = \frac{k_3}{k_4}; \quad k_8 = \frac{k_5}{k_4}$$

$$i_f^* = k_6 \cdot \psi_f^* + k_7 \cdot i_d^* + k_8 \cdot \psi_{kd}^* \quad (2.6)$$

Подставим в уравнение 2.4 значение 2.6

$$i_{kd}^* = k_1 \cdot \psi_{kd}^* - k_2 \cdot i_d^* - k_2 \cdot [k_6 \cdot \psi_f^* - k_7 \cdot i_d^* - k_8 \cdot \psi_{kd}^*]$$

$$i_{kd}^* = \psi_{kd}^* \cdot [k_1 + k_2 \cdot k_8] - i_d^* \cdot [k_2 - k_2 \cdot k_7] - k_2 \cdot k_6 \cdot \psi_f^*,$$

где  $k_9 = k_1 + k_2 \cdot k_8$  ;  $k_{10} = k_2 - k_2 \cdot k_7$  ;  $k_{11} = k_2 \cdot k_6$  отсюда  
получим

$$i_{kd}^* = k_9 \cdot \psi_{kd}^* - k_{10} \cdot i_d^* - k_{11} \cdot \psi_f^* \quad (2.7)$$

Запишем уравнение для потокосцепления якорной обмотки по продольной оси:

$$\psi_d^* = x_d^* \cdot i_d^* + x_{ad}^* \cdot i_f^* + x_{ad}^* \cdot i_{kd}^*,$$

где заменим токи демпферной обмотки и обмотки возбуждения на их значения

$$\psi_d^* = x_d^* \cdot i_d^* + x_{ad}^* \cdot [k_6 \cdot \psi_f^* - k_7 \cdot i_d^* - k_8 \cdot \psi_{kd}^*] + x_{ad}^* \cdot [k_9 \cdot \psi_{kd}^* - k_{10} \cdot i_d^* - k_{11} \cdot \psi_f^*]$$

В результате получим

$$\psi_d^* = i_d^* \cdot [x_d^* - x_{ad}^* k_7 - k_{10} \cdot x_{ad}^*] + \psi_f^* \cdot [x_{ad}^* - x_{ad}^* k_{11}] - \psi_{kd}^* \cdot [x_{ad}^* k_8 - x_{ad}^* k_9]$$

где

$$k_{12} = x_d^* - x_{ad}^* \cdot (k_7 + k_{10}) ; k_{13} = x_{ad}^* \cdot (k_6 - k_{11}) ; k_{14} = x_{ad}^* \cdot (k_8 - k_9) ;$$

$$\psi_d^* = k_{12} \cdot i_d^* + k_{13} \cdot \psi_f^* - k_{14} \cdot \psi_{kd}^* \quad (2.8)$$

Определим переходную функцию двигателя по продольной оси:

$$U_d^* = i_d^* \cdot r_s^* + p \cdot \psi_d^* - (1 - S) \cdot \psi_q^*$$

$$U_d^* = i_d^* \cdot r_s^* + k_{12} \cdot p \cdot i_d^* + k_{13} \cdot p \cdot \psi_f^* - k_{14} \cdot p \cdot \psi_{kd}^* - (1 - S) \cdot \psi_q^*,$$

где

$$E_d^* = k_{13} \cdot p \cdot \psi_f^* - k_{14} \cdot p \cdot \psi_{kd}^* - (1 - S) \cdot \psi_q^* ; U_d^* - E_d^* = i_d^* \cdot [r_s^* + k_{12} \cdot p] ;$$

$$\frac{1}{k_{12} \cdot p + r_s^*} = \frac{i_d^*}{U_d^* - E_d^*}, \text{ где } T_d = \frac{k_{12}}{r_s^*}$$

$$W_d = \frac{1/r_s^*}{T_d \cdot p + 1} \quad (2.9)$$

Для определения ЭДС компенсации продольной и поперечной осей двигателя необходимо дать уравнения расчета производных потокосцеплений:

Производная потокосцепления возбуждения

$$U_f^* = i_f \cdot r_f^* + p \cdot \psi_f^*; \quad p \cdot \psi_f^* = -r_f^* \cdot (k_6 \cdot \psi_f^* - k_7 \cdot i_d^* - k_8 \cdot \psi_{kd}^*) + U_f^*,$$

где

$$k_{15} = r_f^* \cdot k_6; \quad k_{16} = r_f^* \cdot k_7; \quad k_{17} = r_f^* \cdot k_8.$$

$$p \cdot \psi_f^* = k_{16} \cdot i_d^* + k_{17} \cdot \psi_{kd}^* - k_{15} \cdot \psi_f^* + U_f^* \quad (2.10)$$

Производная потокосцепления демпферной обмотки по оси d

$$p \cdot \psi_{kd}^* = -r_{kd}^* \cdot i_d^* = -r_{kd}^* \cdot (k_9 \cdot \psi_{kd}^* - k_{10} \cdot i_d^* - k_{11} \cdot \psi_f^*),$$

где

$$k_{18} = k_9 \cdot r_{kd}^*; \quad k_{19} = k_{10} \cdot r_{kd}^*; \quad k_{20} = k_{11} \cdot r_{kd}^*$$

$$p \cdot \psi_{kd}^* = k_{19} \cdot i_d^* + k_{20} \cdot \psi_f^* + k_{18} \cdot \psi_{kd}^* \quad (2.11)$$

Производная потокосцепления демпферной обмотки по оси q

$$p \cdot \psi_{kq}^* = -r_{kq}^* \cdot i_{kq}^* = -\frac{r_{kq}^*}{x_{kq}^*} \psi_{kq}^* + \frac{r_{kq}^* \cdot x_{aq}^*}{x_{kq}^*} i_q^*,$$

где

$$i_{kq}^* = \frac{\psi_{kq}^*}{x_{kq}^*} - \frac{x_{aq}^*}{x_{kq}^*} i_q^*; \quad k_{21} = \frac{r_{kq}^*}{x_{kq}^*}; \quad k_{22} = \frac{r_{kq}^* \cdot x_{aq}^*}{x_{kq}^*}$$

$$p \cdot \psi_{kq}^* = k_{22} \cdot i_q^* - k_{21} \cdot \psi_{kq}^* \quad (2.12)$$

Вывод переходной функции по поперечной оси выполняется аналогично выводу по продольной оси:

$$\psi_{kq}^* = x_{aq}^* \cdot i_q^* + x_{kq}^* \cdot i_{kq}^*; \quad i_{kq}^* = \frac{\psi_{kq}^*}{x_{kq}^*} - \frac{x_{aq}^*}{x_{kq}^*} \cdot i_q^*,$$

где

$$k_{23} = \frac{1}{x_{kq}^*}; \quad k_{24} = \frac{x_{aq}^*}{x_{kq}^*}, \quad i_{kq}^* = k_{23} \cdot \psi_{kq}^* - i_q^* \cdot k_{24}.$$

Выполним замену переменных

$$\begin{aligned} \psi_q^* &= x_q^* \cdot i_q^* + x_{aq}^* \cdot i_{kq}^* = x_q^* \cdot i_q^* + x_{aq}^* \cdot [k_{23} \cdot \psi_{kq}^* - k_{24} \cdot i_q^*] = \\ &= i_q^* \cdot [x_q^* - x_{aq}^* \cdot k_{24}] + x_{aq}^* \cdot k_{23} \cdot \psi_{kq}^*, \end{aligned}$$

где

$$k_{25} = x_q^* - x_{aq}^* \cdot k_{24}; \quad k_{26} = x_{aq}^* \cdot k_{23}.$$

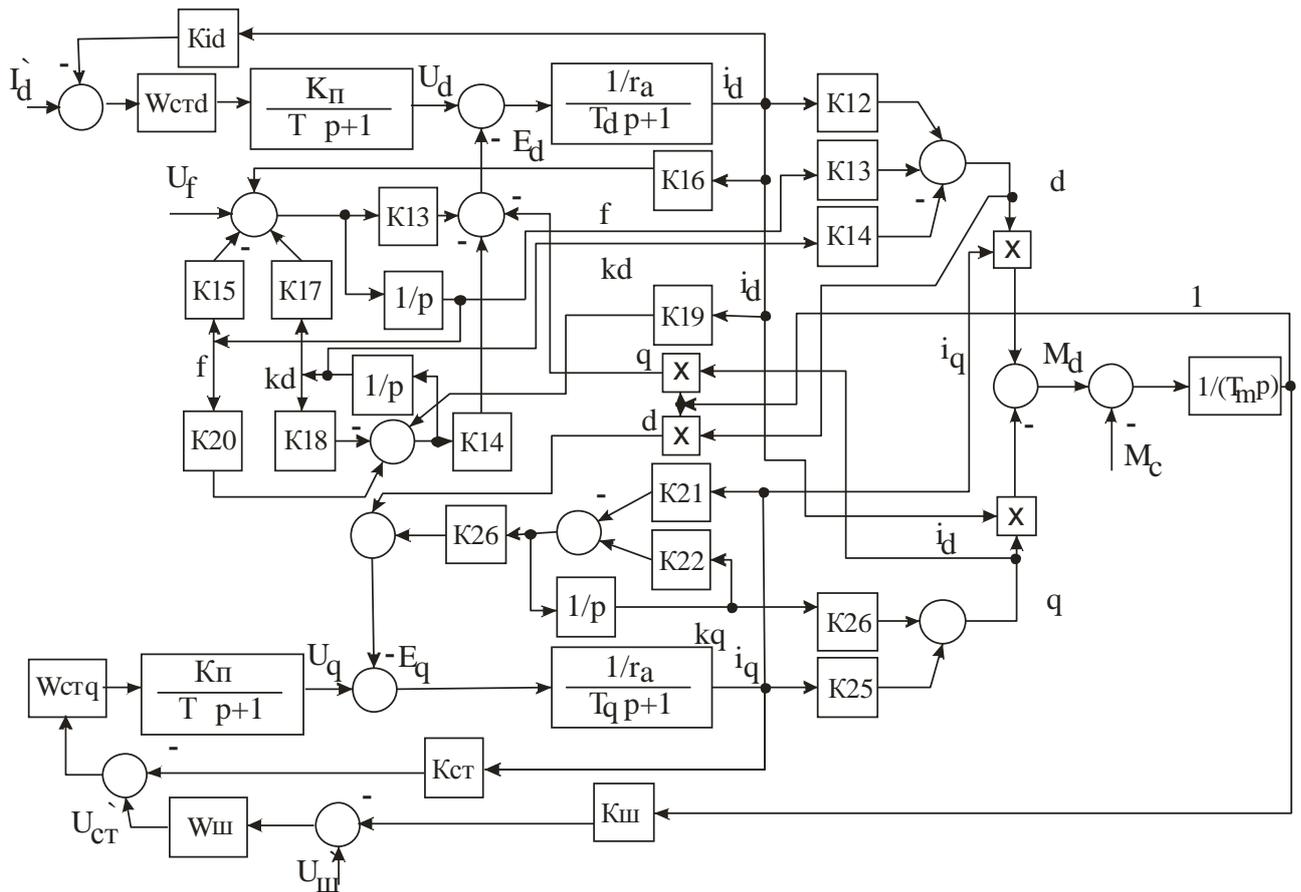
В результате переходная функция по поперечной оси имеет вид

$$\begin{aligned} \psi_q^* &= k_{25} \cdot i_q^* + k_{26} \cdot \psi_{kq}^* \\ U_q^* &= i_q^* \cdot r_s^* + p \cdot \psi_q^* + (1 - S) \cdot \psi_{d\&\&}^* = \\ &= i_q^* \cdot r_s^* + k_{25} \cdot p \cdot i_q^* + k_{26} \cdot p \cdot \psi_{kq}^* + (1 - S) \cdot \psi_d^* \\ \frac{i_q^*}{U_q^* - E_q^*} &= \frac{1/r_s^*}{T_q \cdot p + 1} \end{aligned} \tag{2.13}$$

где

$$T_q = \frac{k_{25}}{r_s^*}.$$

Исходя из полученных параметров, разработана структурная схема синхронного электропривода (рис.2.1). Помимо этого в эту схему включена система управления, где в продольной оси установлен регулятор стабилизации тока  $i_d$ , а в поперечной оси соответственно регулятор тока  $i_q$  и регулятор скорости вращения индуктора.



Регулятори:  $W_{ctrd}$ ,  $W_{ctq}$  – струму якоря,  $W_{ш}$  – швидкості.  
 Коefіцієнти підсилення зворотного зв'язку:  
 $K_{id}$ ,  $K_{ct}$  – поздовжнього та поперечного струму якоря;  
 $K_{ш}$  – швидкості.

Рис.2.1. Структурна схема моделі електропривода

## 2.2 Синтез системы управления скорости

Для вывода переходной функции корректирующего звена контура тока по оси  $d$  необходимо его свернуть. Получим передаточную функцию регулятора тока по продольной оси:

передаточная функция контур тока:

$$W_{id} = W_{pd} \cdot \frac{k_{\pi}}{T_{\mu}p+1} \cdot \frac{1/r_s^*}{T_d p+1} \cdot k_{id};$$

её желаемая функция:

$$W_{id} = \frac{1}{2T_{\mu}p \cdot (T_{\mu}p + 1)},$$

отсюда получим:

$$W_{pd} = \frac{(T_{\mu}p + 1) \cdot (T_d p + 1) \cdot r_s^*}{2T_{\mu}p \cdot (T_{\mu}p + 1) \cdot k_{\pi} \cdot k_{id}}$$

$$W_{pd} = \frac{(T_d p + 1) \cdot r_s^*}{2T_{\mu}p \cdot k_{\pi} \cdot k_{id}} - \text{ПИ} - \text{регулятор.} \quad (2.14)$$

Расчет регулятора тока в поперечной оси:

$$W_{iq} = W_{pq} \cdot \frac{k_{\pi}}{T_{\mu}p + 1} \cdot \frac{1/r_s^*}{T_q p + 1} \cdot k_{iq}.$$

Пользуясь желаемой переходной функцией, как и для продольной оси определяем уравнение регулятора тока:

$$W_{pq} = \frac{(T_q p + 1) \cdot r_s^*}{2T_{\mu}p \cdot k_{\pi} \cdot k_{iq}};$$

Для получения корректирующего звена контура скорости воспользуемся уравнением для сворачивания внутреннего контура тока по оси q:

$$W_{\tau p}^{\Sigma} = \frac{W_{\tau p}}{W_{\tau p} + 1}.$$

Запишем результирующую передаточной функции контура скорости:

$$W_{cq} = W_{pc} \cdot W_{pq} \cdot k_{25} \cdot \frac{1}{T_M p} \cdot k_{gc}$$

Воспользуемся желаемой передаточной функцией контура скорости:

$$W_{ж} = \frac{4T_{\mu}p + 1}{8T_{\mu}^2 p^2 \cdot (T_{\mu}p + 1)},$$

на основании которой определим уравнение переходной функции регулятора скорости:

$$W_c = \frac{4T_\mu p + 1}{8T_\mu^2 p^2 \cdot (T_\mu p + 1)} \cdot \frac{2T_\mu p \cdot (T_\mu p + 1)}{k_{25} \cdot k_{gc}} \cdot T_M p$$

$$W_c = \frac{(4T_\mu p + 1) \cdot T_M}{4T_\mu p \cdot k_{25} \cdot k_{gc}} - \text{ПИ} - \text{регулятор.} \quad (2.15)$$

### 2.3 Исходные данные. Методика определения параметров системы (Приложение А)

*Данные расчетного формуляра завода изготовителя:*

$S_n=4700000$	- номинальная полная мощность, В*А;
$P_n=4000000$	- номинальная активная мощность, Вт;
$U_n=6000$	- номинальное напряжение якоря, В;
$I_n=451$	- номинальный ток якоря, А;
$f= 50$	- номинальная частота сети, Гц;
$\cos \varphi_n=0.9$	- номинальный коэффициент мощности;
$n_n=75$	- номинальная частота вращения индуктора, об/мин.

*Параметры схемы замещения:*

$X_s=0.53; \quad X_1=X_s$	- реактивное сопротивление рассеяния якоря, Ом;
$X_d=3.4$	- реактивное сопротивление реакции якоря по оси d, Ом;
$X_q=2.45$	- реактивное сопротивление реакции якоря по оси q, Ом;
$X_{fs}=1.12$	- реактивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения, Ом;
$X_d' = 1.34$	- переходное сопротивление по продольной оси,

	Ом;
$X_q''=0.854$	- сверхпереходное сопротивление по поперечной оси, Ом;
$X_d''=0.85$	- сверхпереходное сопротивление по продольной оси, Ом;
$T_d' = 0.91$	- постоянные времени (обмотки возбуждения при замкн. статора и разомкн. демпферной обмотки), с;
$T_q''=0.015$	- постоянные времени демпферной обмотки при замкнутой статора, с;
$T_{do}''=0.019$	- постоянные времени демпферной обмотки при разомкнутой статора, с;
$R_{15}=0.055$	- активные сопротивления обмоток фазы якоря при 15 С, Ом.

***Другие исходные данные:***

$GD^2=10000000$	- маховый момент, кг*м <sup>2</sup> ;
$I_{vn}=270$	- номинальный ток возбуждения, А;
$U_{vn}=240$	- номинальное напряжение возбуждения, В;
$U_{vm}=360$	- максимальное напряжение возбуждения, В;

***Для конкретной мельницы:***

$R_{dob}=1.6$	- разрядное сопротивление, Ом;
$J_{mn}=387225$	- неприведенный момент инерции механизма, Н*м;
$i_z=10.0805$	- передаточное число зацепления;
$C=6067093$	- жесткость муфты;
$\psi=0.77$	- коэффициент поглощения для зубчатого зацепления.

***Выбор и расчет базовых величин:***

$$I_b = I_n \cdot \sqrt{2}, \quad I_b = 451 \cdot \sqrt{2} = 637.8 \quad - \text{ базовый ток, А;}$$

$$U_b = U_n \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}, \quad U_b = 6000 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 4890.2 \quad - \text{ базовое напряжение, В;}$$

$$P_b = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n, \quad P_b = \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 451 = 4681980 - \text{ базовая мощность, Вт;}$$

$$f_b = f, \quad f_b = 50 \quad - \text{ базовая частота, Гц;}$$

$$\omega_b = 2 \cdot \pi \cdot f, \quad \omega_b = 314 \quad - \text{ базовая частота вращения, с}^{-1};$$

$$p = 60 \cdot \frac{f_b}{n_n}, \quad p = 40 \quad - \text{ число пар полюсов.}$$

$$\Omega_b = \frac{\omega_b}{p}, \quad \Omega_b = 7.85 \quad - \text{ базовая угловая частота}$$

вращения, с<sup>-1</sup>;

$$M_b = \frac{P_b}{\Omega_b}, \quad M_b = 596430.6 - \text{ базовый момент, Н*м;}$$

$$Z_b = \frac{U_b}{I_b}, \quad Z_b = 7.67 \quad - \text{ базовое сопротивление, Ом;}$$

$$L_b = \frac{Z_b}{\omega_b}, \quad L_b = 0.0244 \quad - \text{ базовая индуктивность, Гн;}$$

$$\psi_b = \frac{U_b}{\omega_b}, \quad \psi_b = 15.57 \quad - \text{ базовое потокосцепление, В;}$$

$$t_b = \frac{1}{\omega_b}, \quad t_b = 0.0032 \quad - \text{ базовое время, с;}$$

$$\varphi_b = \omega_b \cdot t_b, \quad \varphi_b = 1 \quad - \text{ базовый угол поворота, град;}$$

$$J_d = 250000 \quad - \text{ момент инерции двигателя, Нм;}$$

$$J_m = 350000 \quad - \text{ приведенный момент инерции механизма, Нм;}$$

**Предварительный расчет параметров:**

$$C_0 = \frac{c}{64888.695187}, \quad C_0 = 93.5 \quad - \text{ относительная жесткость муфт для}$$

модели;

$$T_{dv} = J_d \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b}, \quad T_{dv} = 3.29 \quad - \text{ постоянная инерции двигателя, с;}$$

$$T_{dvo} = \frac{T_{dv}}{t_b}, \quad T_{dvo} = 1033.66 \quad - \text{ постоянная инерции механизма, о.е.};$$

$$T_m = J_m \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b}, \quad T_m = 4.6 \quad - \text{ механическая постоянная времени,}$$

$$T_{mo} = T_m \cdot \omega_b, \quad T_{mo} = 1447.46 \quad \text{о.е.};$$

$$\Omega_o = \sqrt{C \cdot \frac{(J_d + J_m)}{J_d \cdot J_m}}, \quad \Omega_o = 6.45 \quad - \text{частота собственных колебаний}$$

двухмассовой системы,  $\text{с}^{-1}$ ;

$$\beta = \frac{c \cdot \psi}{2 \cdot \pi \cdot \Omega_o} \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b}, \quad \beta = 1.517 \quad - \text{относительный коэффициент}$$

демпфирования для модели, о.е.;

$$x_d = \frac{X_d}{Z_b}, \quad x_d = 0.44 \quad - \text{индуктивное сопротивление реакции якоря,}$$

о.е.;

$$X_{ad} = X_d - X_1, \quad X_{ad} = 2.87 \quad - \text{индуктивное сопротивление реакции}$$

якоря по продольной оси, Ом;

$$x_{ad} = \frac{X_{ad}}{Z_b}, \quad x_{ad} = 0.374 \quad - \text{индуктивное сопротивление обмотки}$$

якоря, о.е.;

$$X_f = \frac{X_{ad}^2}{x_d - x_d}, \quad X_f = 3.99 \quad - \text{индуктивное сопротивление обмотки, Ом};$$

$$x_f = \frac{X_f}{Z_b}, \quad x_f = 0.52 \quad - \text{индуктивное сопротивление обмотки}$$

возбуждения, о.е.;

$$X_f = X_f - \frac{X_{ad}^2}{x_d}, \quad X_f = 1.576 \quad - \text{переходное индуктивное сопротивление}$$

обмотки возбуждения, Ом;

$$x_f' = \frac{X_f'}{Z_b}, \quad x_f' = 0.205 \quad - \text{в о.е.};$$

$$R_f = \frac{X_f}{\omega_b \cdot T_d}, \quad R_f = 0.0055 \quad - \text{приведенное активное сопротивление}$$

обмотки возбуждения, Ом;

$$r_f' = \frac{R_f'}{Z_b}, \quad r_f' = 0.000718 \quad \text{в о.е.};$$

Индуктивное сопротивление рассеивания демпферной обмотки по продольной оси в Ом:

$$X_{eds} \equiv X_{fs} \cdot X_{ad} \cdot \frac{(X_{d''} - X_s)}{(X_s - X_{d''}) \cdot (X_{fs} + X_{ad}) + X_{ad} \cdot X_{fs}}, \quad X_{eds} = 0.53$$

в о. е.:

$$X_{eds} = \frac{X_{eds}}{Z_b}, \quad X_{eds} = 0.069.$$

Индуктивное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси в Ом:

$$X_{ed} \equiv X_{ad} + X_{eds}, \quad X_{ed} = 3.4$$

в о. е.:

$$X_{ed} = \frac{X_{ed}}{Z_b}, \quad X_{ed} = 0.443.$$

Переходное индуктивное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси в Ом:

$$X_{ed}' \equiv X_{ed} - \frac{X_{ad}^2}{X_f}, \quad X_{ed}' = 1.34$$

в относ. ед.:

$$X_{ed}' = \frac{X_{ed}'}{Z_b}, \quad X_{ed}' = 0.17457.$$

Активное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси в Ом:

$$R_{ed} \equiv \frac{X_{ed}'}{\omega_b \cdot T_{do}'}, \quad R_{ed} = 0.2246$$

в относ. ед.:

$$r_{ed} = \frac{R_{ed}}{Z_b}, \quad r_{ed} = 0.029.$$

Реактивное сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси в Ом:

$$X_{aq} = X_q - X_s,$$

$$X_{eq} = \frac{X_{aq}^2}{X_q - X_q'}, \quad X_{eq} = 2.309$$

В о.е.:

$$x_{eq} = \frac{X_{eq}}{Z_b}, \quad x_{eq} = 0.3.$$

Сверхпереходное сопротивление индуктивной демпферной обмотки по поперечной оси в Ом:

$$X_{eq}'' = X_{eq} - \frac{x_{dq}^2}{X_q}, \quad X_{eq}'' = 0.805$$

В относ. ед.:

$$x_{eq}'' = \frac{X_{eq}''}{Z_b}, \quad x_{eq}'' = 0.104.$$

Активное сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси в Ом:

$$R_{eq} = \frac{X_{eq}'}{\omega_b \cdot T_q''}, \quad R_{eq} = 0.17$$

В относ. ед.:

$$r_{eq} = \frac{R_{eq}}{Z_b}, \quad r_{eq} = 0.0222.$$

**Остальные параметры:**

$$D = x_d \cdot x_f \cdot x_{ed} - x_{ad}^2 \cdot (x_d + x_f + x_{ed}) + 2 \cdot x_{ad}^3, \quad D = 0.01$$

$$x_d'' = \frac{D}{x_f \cdot x_{ed} - x_{ad}^2}, \quad x_d'' = 0.11.$$

$$x_f' = \frac{D}{x_d \cdot x_{ed} - x_{ad}^2}, \quad x_f' = 0.178$$

$$x_{ed}'' = \frac{D}{x_f \cdot x_d - x_{ad}^2}, \quad x_{ed}'' = 0.11$$

$$x_{ded}'' = \frac{D}{x_f \cdot x_{ad} - x_{ad}^2}, \quad x_{ded}'' = 0.1833$$

$$x_{fed}'' = \frac{D}{x_d \cdot x_{ad} - x_{ad}^2}, \quad x_{fed}'' = 0.39$$

$$x_{fd}'' = \frac{D}{x_{ed} \cdot x_{ad} - x_{ad}^2}, \quad x_{fd}'' = 0.39$$

$$x_q = \frac{X_q}{Z_b}, \quad x_q = 0.3189$$

$$x_{aq} = \frac{(X_q - X_s)}{Z_b}, \quad x_{aq} = 0.25$$

$$x_q'' = \frac{x_q \cdot x_{eq} - x_{aq}^2}{x_{eq}}, \quad x_q'' = 0.11$$

$$x_{qeq}'' = \frac{x_q \cdot x_{eq} - x_{aq}^2}{x_{aq}}, \quad x_{qeq}'' = 0.134$$

$$R_{f2} = \frac{U_{vn}}{I_{vn}} = 0.888 \quad - \text{неприведенное сопротивление}$$

обмотки возбуждения, Ом;

$$K_r = \frac{R_f}{R_{f2}} = 0.0062 \quad - \text{коэффициент приведения сопротивления;}$$

$$K_i = \sqrt{\frac{3 \cdot K_r}{2}} = 0.0964 \quad - \text{коэффициент приведения тока;}$$

$$K_u = \frac{K_r}{K_i} = 0.064 \quad - \text{коэффициент приведения напряжения;}$$

$$U_f = U_{vn} \cdot K_u = 15.43 \quad - \text{напряжение возбуждения приведенное к статору:}$$

$$u_{f0} = \frac{U_f}{U_b} = 0.0031 \quad - \text{в относ. ед.};$$

$$u_{fm} = U_{vm} \cdot \frac{K_u}{U_b} = 0.0047 \quad - \text{максимальное напряжение форсировки,}$$

приведенное в относ. ед.;

$$r_{fd} = R_{dob} \cdot \frac{K_r}{Z_b} = 0.0013 \quad - \text{добавочное сопротивление обмотки}$$

$$r_a = \frac{1.32 \cdot R_{15}}{Z_b} = 0.0095 \quad \text{- возбуждения в относ. ед.;}$$

$$M_{сн0} = \frac{\frac{P_n}{\Omega_b}}{M_b} = 0.8534 \quad \text{- относительное активное сопротивление}$$

$$\quad \text{статора в относ. ед.;}$$

$$\quad \text{- относительный номинальный момент}$$

$$\quad \text{нагрузки: в относ. ед.;}$$

**Расчет параметров новой модели, о.е.:**

$$k_{01} = \frac{1}{x_{ed}} = 2.26; \quad k_{02} = \frac{x_{ad}}{x_{ed}} = 0.8439;$$

$$k_{03} = x_{ad} - x_{ad} \cdot k_{02} = 0.058; \quad k_{04} = x_f - x_{ad} \cdot k_{02} = 0.205;$$

$$k_{05} = x_{ad} \cdot k_{01} = 0.844; \quad k_{06} = \frac{1}{k_{04}} = 4.872;$$

$$k_{07} = \frac{k_{03}}{k_{04}} = 0.284; \quad k_{08} = \frac{k_{05}}{k_{04}} = 4.11;$$

$$k_{09} = k_{01} + k_{02} \cdot k_{08} = 5.728; \quad k_{010} = k_{02} - k_{02} \cdot k_{07} = 0.604;$$

$$k_{011} = k_{02} \cdot k_{06} = 4.11; \quad k_{013} = x_{ad} \cdot (k_{06} - k_{011}) = 0.284;$$

$$k_{014} = x_{ad} \cdot (k_{08} - k_{09}) = -0.604; \quad k_{015} = r_f \cdot k_{06} = 0.0035;$$

$$k_{016} = r_f \cdot k_{07} = 0.000204; \quad k_{017} = r_f \cdot k_{08} = 0.00295;$$

$$k_{018} = r_{ed} \cdot k_{09} = 0.168; \quad k_{019} = r_{ed} \cdot k_{010} = 0.017667;$$

$$k_{020} = r_{ed} \cdot k_{011} = 0.12025; \quad k_{021} = \frac{r_{eq}}{x_{eq}} = 0.074;$$

$$k_{022} = \frac{r_{eq} \cdot x_{aq}}{x_{eq}} = 0.0185; \quad k_{023} = \frac{1}{x_{eq}} = 3.325;$$

$$k_{024} = \frac{x_{aq}}{x_{eq}} = 0.83; \quad k_{025} = x_q - x_{aq} \cdot k_{024} = 0.1112;$$

$$k_{026} = x_{aq} \cdot k_{023} = 0.83125; \quad \frac{1}{r_a} = 105.798;$$

$$T_{dd} = \frac{k_{012}}{r_a \cdot 1} = 11.7175; \quad T_{qq} = \frac{k_{025}}{r_a \cdot 1} = 11.763.$$

## ВЫВОДЫ

1. Ввиду невозможности синтеза системы управления на базе классической модели синхронного двигателя в работе использована оригинальная модель СД для случаев частотного управления.
2. При синтезе регуляторов модели электромеханической системы (СД – барабанная мельница) установлено, что их структура в продольной и поперечной оси имеет ПИ-форму.
3. Упрощение модели может быть достигнуто путем представления ее переходных функций в относительных единицах, где в качестве исходных материалов используются данные расчетного формуляра завода изготовителя на исследуемый двигатель.

## ГЛАВА 3

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

#### 3.1. Разработка модели электромеханической системы

Выполним расчет коэффициентов регулятора тока оси d. Для этого используем уравнение 2.14 из пункта 2.2, подставляя значения получим ПИ-часть регулятора:

$$\begin{aligned} W_{pd} &= \frac{(T_d p + 1) \cdot r_s^*}{2T_\mu p \cdot k_n \cdot k_{id}} = \frac{(11,7175p + 1) \cdot 0,00945}{0,01p \cdot 0,195 \cdot 22} = \frac{0,11p + 0,00945}{0,043p} \\ &= 2,56 + 0,22 \cdot \frac{1}{p} \end{aligned}$$

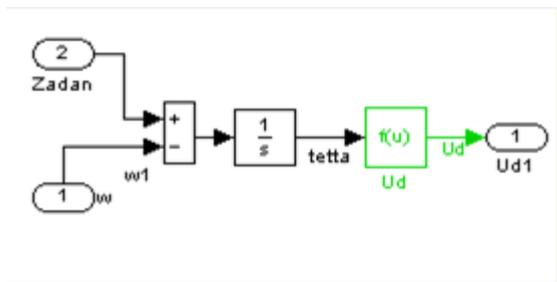
Далее выполняется расчет регулятора тока поперечной оси q. Используем для расчета формулу пункта 2.2. Подставим и получим ПИ-часть регулятора системы:

$$\begin{aligned} W_{pq} &= \frac{(T_q p + 1) \cdot r_s^*}{2T_\mu p \cdot k_n \cdot k_{iq}} = \frac{(0,015p + 1) \cdot 0,00945}{0,01p \cdot 22 \cdot 0,195} = \frac{0,014p + 0,00945}{0,043p} = \\ &= 0,33 + \frac{1}{p} \cdot 0,22 \end{aligned}$$

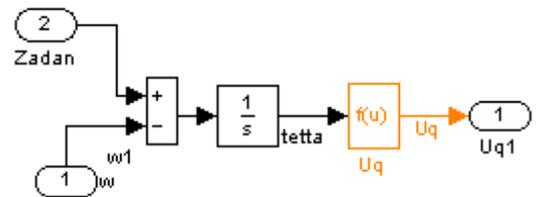
Далее выполняется расчет регулятора скорости поперечной оси q. Используем для расчета формулу 2.15 пункта 2.2. Подставим и получим ПИ-часть регулятора :

$$\begin{aligned} W_c &= \frac{(4T_\mu p + 1) \cdot T_M}{4T_\mu p \cdot k_{25} \cdot k_{gc}} = \frac{(0,02p + 1) \cdot 4,6}{0,02p \cdot 0,1112 \cdot 0,053} = \frac{0,092p + 4,6}{0,00011p} \\ &= 836,4 + 41818,2 \cdot \frac{1}{p} \end{aligned}$$

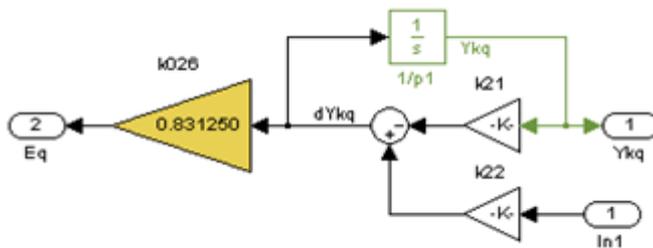
На основе структурной схемы (рис.2.1) и расчетов разработана Matlab модель, состоящая из модели двигателя, системы управление по осям d и q, а так же механизма представленных на рис.3.2. В состав модели входят ряд подсистем (рис. 3.1-3.4).



а)



б)



в)

Рис.3.2 Принципиальные схемы подсистем:

а) U по оси d б) U по оси q;

в) блок к21-к22

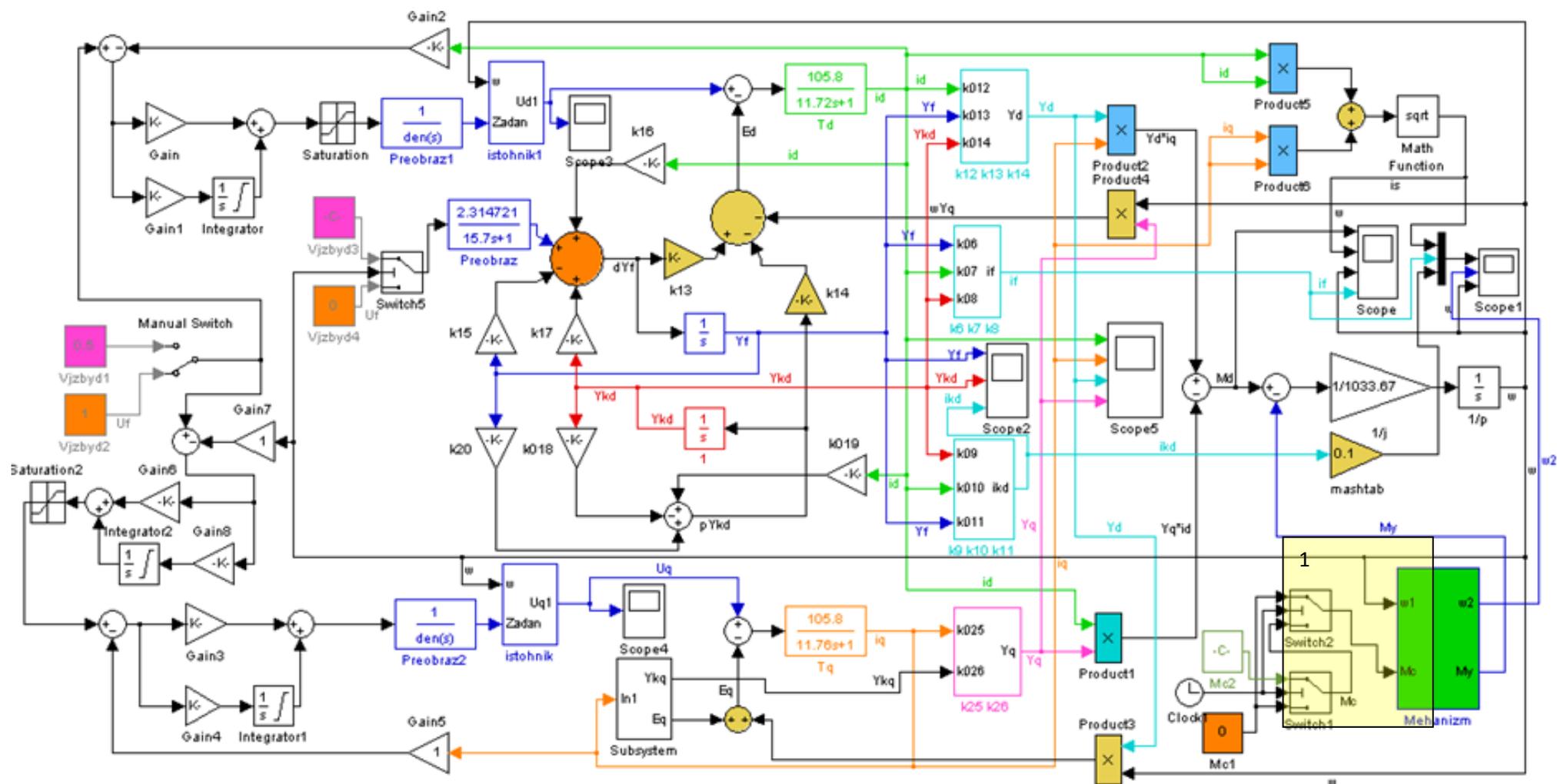
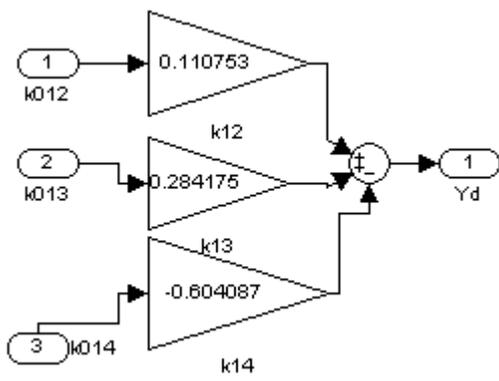
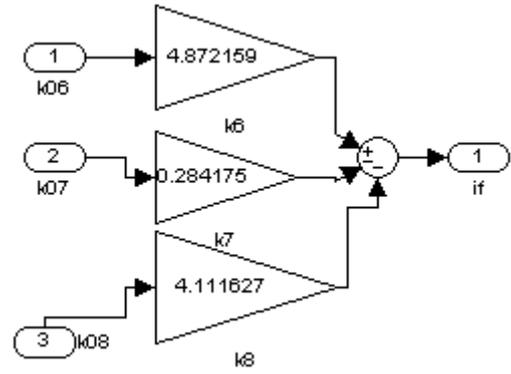


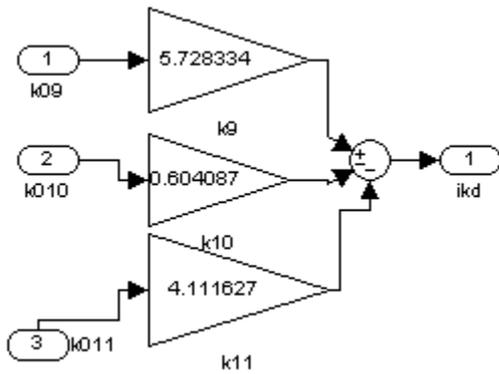
Рис 3.2. Схема Simulink модели электромеханической системы.



a)



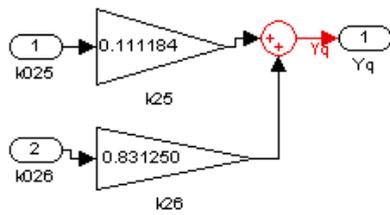
б)



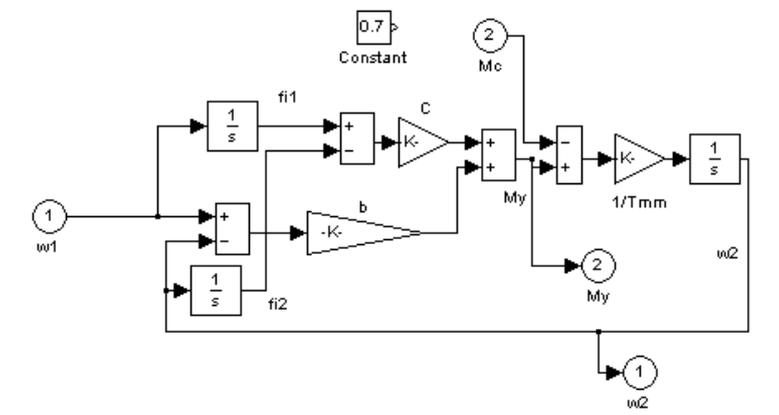
в)

Рис.3.3 Принципиальные схемы подсистем

а) блок к12-к14; б) блок к6-к8; в) блок к9-к11



а)



б)

Рис. 3.4 Принципиальные схемы подсистем

а) блок к25,к26; б) механизм

### **3.2. Анализ результатов исследования системы.**

В состав модели включен блок реализации барабанной мельницы. Для модели принято номинальное значение нагрузки. Условия проведения эксперимента – процесс моделирования предполагал исследование следующих режимов работы: запуск под нагрузкой; режим реализации установленного значения с номинальной скоростью; режим снижения скорости на 20%.

В результате выполненных исследований получены графики переходных процессов, исследуемых механических систем, которые изображены на рис.3.5. Процесс запуска из рис. 3.5.1 длится  $3 \cdot 10^3$  о.е. времени и практически не отличается от стандартных условий. Из графиков переходных процессов рис. 3.5 показана стабильная работа системы в установленном режиме. Смена заданной скорости вносит некоторое возмущение в части электромагнитных колебаний, что несущественно отражается на процесс изменения скорости вращения двигателя. Избыточная колебательность электромеханической системы привода при переходе с одной скорости на другую объясняется тем, что некоторые биение момента, а как следствие и тока якоря, возникает за счет наличия упругих связей между двигателем и рабочей машиной.

Комплекс выполненных исследований дает основание сделать вывод о том, что для механизма типа барабанно-измельчительной установки разработанная система управления дает удовлетворительный результат.

#### **Вывод:**

1. Опыт разработки модели электромеханических систем (барабанная мельница) еще раз подтвердил, что оригинальная модель двигателя, создана для частотного управления, достаточно хорошо обеспечивает синтез корректирующих звеньев для первой и второй зоны синхронного электропривода.

2. Результаты моделирования переходных процессов электромеханической системы подтверждают принципиальную

работоспособность системы регулирования скорости, несмотря на некоторые возникновения колебательности электромеханических параметров привода при переходе из одного состояния во второе.

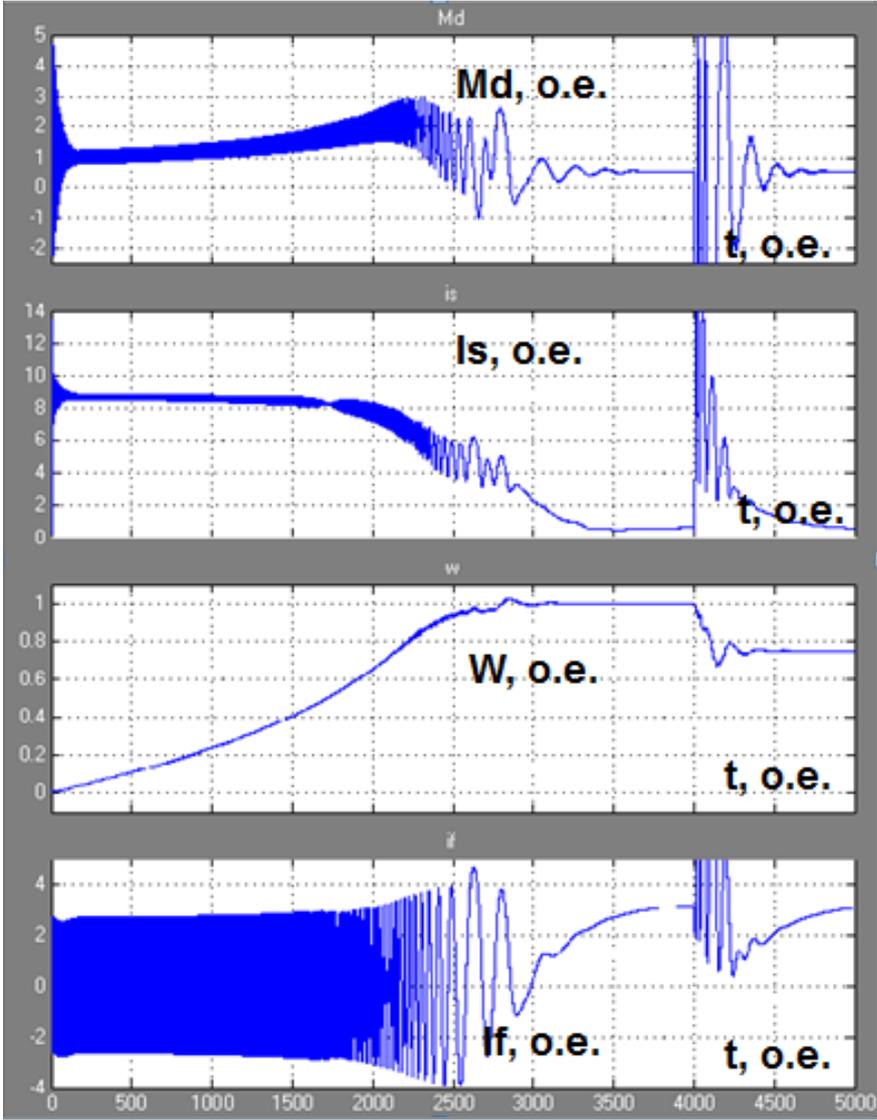


Рис. 3.5. Результаты моделирования

## ГЛАВА 4

### ТЕХНИКО – ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

#### **Введение**

Актуальность вопросов, рассмотренных в специальной части дипломного проекта, связана с состоянием электромеханического оборудования, эксплуатируемого в области измельчения железной руды. Технически устаревшее электрооборудование имеет низкую надежность работы, малый коэффициент полезного действия, требует больших затрат на обслуживание по сравнению с современными системами электропривода. Поэтому к нему предъявляются большие требования по надежности работы и снижению времени обслуживания техническим персоналом.

В условиях высокоразвитого производства средств автоматизации, характеризующегося сложными организационными связями, высокой технической оснащенностью производства, каждый объект новой техники должен быть экономически целесообразен, иметь четкую оценку эффективности производства и эксплуатации.

Таким образом, целью данного раздела является экономическое обоснование целесообразности технического переворота производственного процесса по измельчению железной руды путем замены асинхронного привода на синхронный с двухзонным регулированием скорости. При внедрении нового оборудования ожидается, что источником экономической эффективности будет уменьшение простоев, уменьшение потребляемой электроэнергии, снижение затрат на текущий ремонт.

При расчете эффективности внедрения выше указанного электропривода рассматриваем следующие вопросы:

1. расчет капитальных затрат на приобретение и монтаж электротехнического оборудования;
2. расчет годовых эксплуатационных расходов на содержание и обслуживание объекта проектирования;

3. определение годовой экономии от внедрения объекта проектирования;
4. определение и анализ показателей экономической эффективности предлагаемого решения;
5. вывод об экономической целесообразности проектирования.

#### **4.1 Капитальные затраты на приобретение и монтаж тяжелого СД весом в 15 тонн.**

Капитальные вложения – это денежные средства, предназначенные для создания и приобретения основных фондов и нематериальных активов, подлежащих амортизации. В данном случае это денежные средства, предназначенные для приобретения электрооборудования, подлежащего амортизации, транспортно-заготовительные и складские расходы, монтаж и наладка системы управления.

Расчет капитальных затрат оформлен в виде сводки капитальных затрат по разделам (таблица 4.1).

Капитальные затраты ( $K_{np}$ ) на осуществления проектного варианта составляют:

$$K_{np} = K_{об}(\sum_{i=1}^K C_i) + Z_{мзс} + Z_{м} + Z_{н} + Z_{np} - C_{ф}, \quad (4.1)$$

где  $K_{об}(\sum_{i=1}^K C_i)$  – суммарная стоимость комплектующих изделий (табл. 4.1);

$K$  – количество необходимых комплектующих элементов;

$Z_{мзс}$  – транспортно-заготовительные и складские расходы;

$Z_{м}$  – затраты на монтажные работы (табл. 4.2);

$Z_{н}$  – затраты на наладочные работы (табл. 4.3);

$Z_{np}$  – прочие затраты (табл. 4.5);

$C_{\phi}$  – цена, реализуемого оборудования после демонтажа.

Таблица 4.1 – Сводка капитальных затрат, грн.

Наименование технических средств	Количество	Цена за единицу, тис.грн	Сумма, тис.грн	Обоснование
Синхронный двигатель СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4 4МВт	1	7 000 ,00	7 000 ,00	Херсонская область, г. Новая Каховка, ул. Первомайская, 35-а +380-55-497-22-88
Частотный преобразователь	1	4 300 ,00	4 300 ,00	Херсонская область, г. Новая Каховка, ул. Первомайская, 35-а +380-55-497-22-88

Стоимость доставки комплектующих предусмотрены компанией АО "Завод Крупных Электрических Машин" в стоимость агрегатов.

Стоимость оплаты труда электромонтера согласно Минфин составляет:

по I разряду – 22,41 грн;

по III разряду – 26,44 грн;

по IV разряду – 28,46 грн;

по IV разряду – 30,47 грн;

по VI разряду – 32,50 грн.

Таблица 4.2 – Затраты на монтаж ( $Z_m$ )

Наименование затрат	Ед. изм.	Обозначение	Значение*
Численность работников	чел.	$\Psi$	5
Часовая тарифная сетка, IV разряда	грн/час	$a$	28,46
Время для выполнения работ	час	$t$	20
Коэффициент, учитывающий размер доплат		$K_\partial$	1,1
Коэффициент, учитывающий единый социальный взнос		1	1,22
Коэффициент, учитывающий прочие затраты		$K_{np}$	1,05

$$Z_m = \sum (\Psi \cdot a \cdot t) \cdot K_\partial \cdot K_{см} \cdot K_{np} = 5 \cdot 28,46 \cdot 20 \cdot 1,1 \cdot 1,22 \cdot 1,05 = 4010 \text{ грн.}$$

\* Данные взяты согласно с сметами и инструкциями института «Днепрогипрошахт».

Таблица 4.3 – Затраты на наладку ( $Z_n$ )

Наименование затрат	Ед. изм.	Обозначение	Значение
Численность работников	чел.	$\Psi$	4
Часовая тарифная сетка, VI разряда	грн/час	$a$	32,50
Время для выполнения работ	час	$t$	40
Коэффициент, учитывающий размер доплат		$K_\partial$	1,1
Коэффициент, учитывающий единый социальный взнос		$K_{см}$	1,22
Коэффициент, учитывающий прочие затраты		$K_{np}$	1,05

$$Z_n = \sum (Ч \cdot a \cdot t) \cdot K_{\partial} \cdot K_{см} \cdot K_{пр} = 4 \cdot 32,50 \cdot 40 \cdot 1,1 \cdot 1,22 \cdot 1,05 = 7327 \text{ грн.}$$

где Ч – количество человек необходимое для монтажа и наладки оборудования;

а – часовая тарифная ставка, грн/ч;

t – время, необходимое для монтажа и наладки оборудования, ч;

$K_{\partial}$  – коэффициент, учитывающий размер доплат;

$K_{см}$  – коэффициент, учитывающий отчисления на социальные мероприятия;

$K_{пр}$  – коэффициент учитывающий прочие расходы на осуществление монтажных работ.

Таблица 4.4– Затраты на демонтаж (Д)

Наименование затрат	Ед. изм.	Обозначение	Значение
Численность работников	чел.	Ч	6
Часовая тарифная сетка, III разряда	грн/час	а	26,44
Время для выполнения работ	час	t	17
Коэффициент, учитывающий размер доплат		$K_{\partial}$	1,1
Коэффициент, учитывающий единый социальный взнос		$K_{см}$	1,22
Коэффициент, учитывающий прочие затраты		$K_{пр}$	1,05

$$D = \sum (Ч \cdot a \cdot t) \cdot K_{\partial} \cdot K_{см} \cdot K_{пр} = 6 \cdot 26,44 \cdot 17 \cdot 1,1 \cdot 1,22 \cdot 1,05 = 3800 \text{ грн.}$$

Таблица 4.5 – Прочие единовременные расходы

Наименование расходов	Сумма, грн
Демонтаж базового оборудования	3800
Проектно-конструкторские работы	0
ВСЕГО	3800

Демонтирование оборудование было частично реализовано по цене:

$$C_{\phi} = 500\,000 \text{ грн.}$$

$$K_{np} = 7\,000\,000 + 4\,300\,000 + 4010 + 7327 + 3800 - 500\,000 = 10\,815\,137 \text{ грн.}$$

#### 4.2 Расчет эксплуатационных расходов

Эксплуатационные расходы – это текущие затраты на эксплуатацию и обслуживание объекта проектирования за определённый период, выражены в денежной форме.

К основным статьям эксплуатационных расходов по электротехническому оборудованию относятся:

- амортизационные отчисления ( $C_a$ );
- заработная плата обслуживающего персонала ( $C_3$ );
- отчисления на социальные мероприятия от заработной платы ( $C_c$ );
- затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт оборудования ( $C_m$ );
- стоимость электроэнергии, потребляемой объектом проектирования ( $C_3$ );
- прочие эксплуатационные расходы ( $C_{np}$ ).

Таким образом, годовые эксплуатационные расходы составляют:

$$C = C_a + C_3 + C_c + C_m + C_3 + C_{np} \quad (4.2)$$

#### 4.2.1 Расчёт амортизационных отчислений

Годовой фонд амортизационных отчислений определяется в процентах от суммы капитальных затрат по видам основных фондов и нематериальных активов по разделам сводки капитальных затрат. Балансовая стоимость базового электрооборудования составляет **10 815 137** грн. Расчет выполнен по формуле (4.3) и сведен в таблицу 4.6.

$$C_a = K \cdot \frac{H_a}{100}, \quad (4.3)$$

где  $H_a$  – норма амортизации для заменяемого оборудования, заменяемое оборудование относится к 4-й группе основных фондов.

Таблица 4.6 – Расчёт амортизационных отчислений

Наименование	Капитальные затраты, грн.	Норма амортизации, %	Сумма амортизации, грн.
Проектный вариант	11 300 000	20	2 260 000
Базовый вариант	10 815 137	20	2 163 027

#### 4.2.2. Определение годовых затрат на эксплуатацию и обслуживание

Годовые затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт электротехнического оборудования включают затраты на материалы, запасные части, заработную плату ремонтным рабочим и могут определяться по фактическим данным предприятия. В таблице 4.7 приведены годовые затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт.

Таблица 4.7 – Годовые затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт

Наименование	Ед. изм.	Базовый	Проектный
Количество устройств автоматики, подлежащей ремонту	шт.	2	2
Часовая ставка рабочих V разряда, выполняющих ремонт	грн.	30,47	30,47
Число ремонтов в год		4	2
Количество однотипных заменяемых элементов	шт.	8	8
Стоимость однотипных заменяемых элементов	грн.	5000	5000
Средний срок службы деталей одного типа	часов	10000	10000
Число часов работы агрегата в год	часов	<b>6024</b>	<b>6024</b>

Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт:

$$Z_{m.p.} = R \cdot t \cdot m \cdot R_{\Sigma} + \frac{S \cdot \Pi}{T} \cdot T_{\phi} \quad (4.4)$$

где  $R$  – часовая ставка рабочих, выполняющих ремонт, грн;

$t$  – трудоемкость одного ремонта (для среднего принимаем 7ч/ед.);

$m$  – число ремонтов за год;

$R_{\Sigma}$  – суммарная категория сложности ремонта (принимаем 4);

$S$  – стоимость однотипных заменяемых элементов, грн;

$\Pi$  – количество однотипных заменяемых элементов, грн;

$T$  – средний срок службы деталей одного типа, час;

$T_{\phi}$  – число часов работы аппаратуры в год, час.

В свою очередь эффективный фонд рабочего времени оборудования  $T_{\text{эф}}$  определяется как календарный фонд времени  $T_{\text{кал}}$  (длительность года - 365

дней) за вычетом выходных и праздничных дней  $T_{\text{нераб}}$  (в 2018 году – 114 дней).

$$\begin{aligned} T_{\text{эф}} &= T_{\text{кал}} - T_{\text{нераб}} - T_{\text{ппр}} - T_{\text{техн}} = \\ &= 365 \text{ дней} \cdot 8 \text{ часов в смену} \cdot 3 \text{ смены} - 114 \text{ дней} \cdot \\ &\cdot 8 \text{ часов в смену} \cdot 3 \text{ смены} = 6024 \text{ часов.} \end{aligned}$$

Базовые затраты:

$$Z_{\text{м.р.}} = 30,47 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 4 + \frac{5000 \cdot 8}{10000} \cdot 6024 = 27509 \text{ грн};$$

Проектные затраты:

$$Z_{\text{м.р.}} = 30,47 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 4 + \frac{5000 \cdot 8}{10000} \cdot 6024 = 25802 \text{ грн.}$$

#### 4.2.3 Расчет стоимости потребленной электроэнергии

Стоимость электроэнергии, потребляемой объектом проектирования в течение года, определяется исходя из его установленной мощности и годового фонда рабочего времени объекта проектирования по формуле:

$$C_3 = W_2 \cdot C_3, \text{ грн} \quad (4.5)$$

где  $W_2$  – количество потребленной за год электроэнергии, кВт·ч;

$C_3$  – тариф на электроэнергию по состоянию на конкретную дату, грн/кВт·ч.

Для предприятий I класса тарифная ставка на электроэнергию составляет 2,05 грн/кВт·ч с ПДВ по ДТЕК ( постановление НКРЕКУ от 28.12.2017 №1513 "Об утверждении прогнозируемой оптовой рыночной цены на 2018 год")

$$W_2 = N_y \cdot T_n \cdot K_{\text{инт}} \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (4.6)$$

где  $N_y$  – установленная мощность оборудования;

$T_n$  – номинальное время работы оборудования за год;

$K_{\text{инт}}$  – интегральный коэффициент использования мощности.

Количество электроэнергии, потребляемое агрегатом за год:

$$W_{\varepsilon 1} = 4000 \cdot 6024 \cdot 0,6 = 14\,457\,600 \text{ кВт}.$$

Расходы на электроэнергию агрегата составят:

$$C_{\varepsilon 1} = 14\,457\,600 \cdot 2,05 = 29\,638\,080 \text{ грн.}$$

Количество электроэнергии, потребляемое базовым агрегатом за год:

$$W_{\varepsilon 2} = 4500 \cdot 6024 \cdot 0,6 = 16\,264\,800 \text{ кВт}.$$

Расходы на электроэнергию базового агрегатом составят:

$$C_{\varepsilon 2} = 16\,264\,800 \cdot 2,05 = 33\,342\,840 \text{ грн.}$$

### 4.3 Определение годовой экономии от внедрения проекта

Полная годовая экономия от внедрения проекта определяется с учетом эксплуатационных затрат по данному объекту:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_2 \pm \Delta C, \text{ грн} \quad (4.7)$$

где  $\Delta C$  – экономия (перерасход) на эксплуатационных расходах.

$$\Delta C = C_{\text{баз}} - C_{\text{пр}};$$

$$C_{\text{баз}} = C_a + C_m + C_{\varepsilon 2} = 2379330 + 27509 + 33342840 = 35\,749\,679 \text{ грн};$$

$$C_{np} = C_a + C_m + C_{з1} = 2\,486\,000 + 25\,802 + 29\,638\,080 = 32\,149\,882 \text{ грн};$$

$$\Delta C = C_{баз} - C_{np} = 35\,749\,679 - 32\,149\,882 = 3\,599\,797 \text{ грн};$$

$$\mathcal{E} = 3\,599\,797 \text{ грн.}$$

#### 4.4 Определение и анализ показателей экономической эффективности проекта

Коэффициент эффективности капитальных затрат  $E_p$  показывает, сколько гривен дополнительной прибыли приносит одна гривна капитальных затрат:

$$E_p = \frac{\mathcal{E}}{K}, \text{ доли ед.}, \quad (4.8)$$

где  $\mathcal{E}$  – общая годовая экономия от внедрения объекта проектирования, грн.;

$K$  – капитальные затраты, вызвавшие экономию, грн.

$$E_p = \frac{3\,599\,797}{10\,815\,138} = 0,33 \text{ доли ед.}$$

Срок окупаемости капитальных затрат  $T_p$  показывает, за сколько лет они окупятся за счёт общей экономии от внедрения проекта:

$$T_p = \frac{K}{\mathcal{E}}, \text{ лет} \quad (4.9)$$

$$T_p = \frac{10\,815\,138}{3\,599\,797} \approx 3 \text{ года.}$$

Для окончательной оценки необходимо сравнить расчетное значение  $E_p$  с нормативным значением  $E_n$ . Проект признается экономически целесообразным, если расчетный коэффициент эффективности превышает величину банковской

кредитной ставки:

$$E_p \geq E_n \text{ т.е. } E_p \geq \frac{N_{кр} + N_{инф}}{100} = \frac{18 + 14,94}{100} \approx 0,33$$

где  $N_{кр}$  – банковская кредитная ставка, %;

$N_{инф}$  – годовой уровень инфляции, %.

Таким образом, имеем:  $0,33 \geq 0,33$ .

Проектный вариант можно считать экономически целесообразным.

## **Выводы**

В экономическом разделе проведено технико-экономическое обоснование целесообразности проектного решения. Выполнен расчет экономической эффективности проектного объекта замены так же было выполнено сравнение базового и проектного вариантов. Общая годовая экономия от внедрения системы составляет **3 599 797** грн, за счет повышения надёжности оборудования, уменьшения потребляемой электроэнергии, снижения затрат на техническое обслуживание и текущий ремонт.

Срок окупаемости проекта по замене оборудования барабанной (шаровой) мельницы составляет 3 года, что меньше нормы окупаемости, следовательно, можно сделать вывод - модернизация барабанной дробилки экономически выгодна.

## **Заключение**

В данной работе были решены следующие научные задания: выбор и обоснование перспективы направления усовершенствования синхронного привода; определение структуры и параметров системы регулирования скорости синхронного привода мощных барабанных мельниц; исследование и доказательства, с которым есть возможность применения системы регулирования скорости синхронного привода мощных барабанных мельниц.

Технологическая задача работы состоит в повышении эффективности измельчительного оборудования, она достигнута путем применения регулируемого привода, который обеспечивается за счет непрерывного подбора скоростного режима, что создает условия для максимальной производительности. Так же одним из способов уменьшения энергоемкости оборудования есть применение управляемого электропривода с высоким КПД, в частности привод на базе синхронного двигателя.

В работе использована оригинальная модель синхронного двигателя для случаев частотного управления с помощью, которой синтезированы регуляторы модели системы, а так же определены их структуры. Для упрощения модели использованы относительные единицы, где в качестве исходных материалов задействованы данные расчетного формуляра завода изготовителя. В ходе разработки модели электромеханической системы установлено, что оригинальная модель достаточно хорошо обеспечивает синтез корректирующих звеньев для первой и второй зоны регулирования. Результаты моделирования показывают принципиальную работоспособность системы регулирования синхронного привода мощных барабанных мельниц.

Расчет параметров модели синхронного привода

**Расчет параметров синхронного двигателя**

*Паспортные данные:*

$$S_n \equiv 4700000 \quad P_n \equiv 4000000 \quad U_n \equiv 6000 \quad I_n \equiv 451 \quad f \equiv 50 \quad \cos\phi_n \equiv 0.9 \quad n_n \equiv 75$$

*Реактивные сопротивления (в Ом)*

$X_s \equiv 0.53$	$X_l \equiv X_s$	Рассеивания обмотки статора
$X_d \equiv 3.4$		Реакции статора по продольной оси
$X_q \equiv 2.45$		Реакции статора по поперечной оси
$X_{fs} \equiv 1.12$		Рассеивания обмотки возбуждения
$X_d' \equiv 1.34$		Переходное сопротивление по продольной оси
$X_q'' \equiv 0.854$		Переходное сопротивление по поперечной оси
$X_d'' \equiv 0.85$		Сверхпереходное сопротивление по продольной оси

*Постоянные времени (в с):*

$T_d' \equiv 0.91$	Обмотки возбуждения при замкн. статора и разомкн. демпферной обмотки
$T_q'' \equiv 0.015$	Демпферной обмотки при замкнутой статора
$T_{do}'' \equiv 0.019$	Демпферной обмотки при замкнутой возбуждения и разомкнутой статора

*Активные сопротивления обмоток:*

$R_{15} \equiv 0.055$	Сопротивление фазы статора при 15 С
-----------------------	-------------------------------------

*Другие исходные данные:*

$GD^2 \equiv 1000000$	Маховый момент
$I_{vn} \equiv 270$	Номинальный ток возбуждения
$U_{vn} \equiv 240$	Номинальное напряжение возбуждения
$U_{vm} \equiv 360$	Максимальное напряжение возбуждения

*Для конкретной мельницы:*

$R_{dob} \equiv 1.6$	Разрядное сопротивление
$J_{mm} \equiv 387225$	Неприведенный момент инерции механизма
$i_z \equiv 10.0805$	Передаточное число зацепления
$C \equiv 6067093$	Жесткость муфты
$\Psi \equiv 0.77$	Коэффициент поглощения для зубчатого зацепления

## ***РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ***

Базовый ток:	$I_b \equiv I_n \cdot \sqrt{2}$	$I_b = 637.810317$
Базовое напряжение:	$U_b \equiv U_n \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	$U_b = 4898.979486$
Базовая мощность:	$P_b \equiv \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n$	$P_b = 4.686929 \times 10^6$
Базовая частота:	$f_b \equiv f$	$f_b = 50.000000$
Базовая частота вращения:	$\omega_b \equiv 2 \cdot \pi \cdot f$	$\omega_b = 314.159265$
	$p \equiv 60 \cdot \frac{f_b}{n_n}$	$p = 40.000000$
Базовая угловая частота вращения:	$\Omega_b \equiv \frac{\omega_b}{p}$	$\Omega_b = 7.853982$
Базовый момент:	$M_b \equiv \frac{P_b}{\Omega_b}$	$M_b = 596758.396405$
Базовое сопротивление:	$Z_b \equiv \frac{U_b}{I_b}$	$Z_b = 7.680935$
Базовая индуктивность:	$L_b \equiv \frac{Z_b}{\omega_b}$	$L_b = 0.024449$
Базовое потокоцепление:	$\Psi_b \equiv \frac{U_b}{\omega_b}$	$\Psi_b = 15.593936$
Базовый срок:	$t_b \equiv \frac{1}{\omega_b}$	$t_b = 0.003183$
	$\phi_b \equiv \omega_b \cdot t_b$	$\phi_b = 1.000000$
Момент инерции двигателя:	$J_d \equiv 250000$	$J_d = 250000.000000$
Приведенный момент инерции механизма:	$J_m \equiv 350000$	$J_m = 350000.000000$
Относительная жесткость муфт для модели:	$C_o \equiv \frac{C}{64888.695187}$	$93.500000 \quad C_o = 93.500000$
Постоянная инерции двигателя:		
в секундах	$T_{dv} \equiv J_d \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b}$	$T_{dv} = 3.290269$
в относительных единицах	$T_{dvo} \equiv \frac{T_{dv}}{t_b}$	$T_{dvo} = 1033.668364$

Постоянная инерции механизма:

$$\text{в секундах} \quad T_m \equiv J_m \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b} \quad T_m = 4.606376$$

$$\text{в относительных единицах} \quad T_{m0} \equiv T_m \cdot \omega_b \quad T_{m0} = 1447.135709$$

Частота собственных колебаний  
двухмассовой системы:

$$\Omega_0 \equiv \sqrt{C \cdot \frac{(J_d + J_m)}{J_d \cdot J_m}} \quad \Omega_0 = 6.450033$$

Относительный коэффициент  
демпфирования для модели:

$$\beta \equiv \frac{C \cdot \Psi}{2 \cdot \pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{\Omega_b^2}{P_b} \quad \beta = 1.517123$$

Индуктивное сопротивление  
реакции статора в относ. ед.:

$$x_d \equiv \frac{X_d}{Z_b} \quad x_d = 0.442654$$

Индуктивное сопротивление реакции  
якоря по продольной оси в Ом:

$$X_{ad} \equiv X_d - X_l \quad X_{ad} = 2.870000$$

в относ. ед.:

$$x_{ad} \equiv \frac{X_{ad}}{Z_b} \quad x_{ad} = 0.373652$$

Индуктивное сопротивление  
обмотки возбуждения в Ом:

$$X_f \equiv \frac{X_{ad}^2}{X_d - X_{d'}} \quad X_f = 3.998495$$

в относ. ед.:

$$x_f \equiv \frac{X_f}{Z_b} \quad x_f = 0.520574$$

Переходное индуктивное сопротивление  
обмотки возбуждения в Ом:

$$X_f' \equiv X_f - \frac{X_{ad}^2}{X_d} \quad X_f' = 1.575877$$

в относ. ед.:

$$x_f' \equiv \frac{X_f'}{Z_b} \quad x_f' = 0.205167$$

Приведенное активное сопротивление  
обмотки возбуждения в Ом:

$$R_f \equiv \frac{X_f'}{\omega_b \cdot T_d'} \quad R_f = 0.005512$$

в относ. ед.:

$$r_f \equiv \frac{R_f}{Z_b} \quad r_f = 0.000718$$

Индуктивное сопротивление рассеивания  
демпферной обмотки по продольной оси в Ом:

$$X_{eds} \equiv X_{fs} \cdot X_{ad} \cdot \frac{(X_{d''} - X_s)}{(X_s - X_{d''}) \cdot (X_{fs} + X_{ad}) + X_{ad} \cdot X_{fs}} \quad X_{eds} = 0.530867$$

в относ. ед.:

$$x_{eds} \equiv \frac{X_{eds}}{Z_b} \quad x_{eds} = 0.069115$$

Индуктивное сопротивление демпферной  
обмотки по продольной оси в Ом:

$$X_{ed} \equiv X_{ad} + X_{eds} \quad X_{ed} = 3.400867$$

в относ. ед.:

$$x_{ed} \equiv \frac{X_{ed}}{Z_b} \quad x_{ed} = 0.442767$$

Переходное индуктивное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси в Ом:

$$X_{ed}' \equiv X_{ed} - \frac{X_{ad}^2}{X_f} \quad X_{ed}' = 1.340867$$

в относ. ед.:

$$x_{ed}' \equiv \frac{X_{ed}'}{Z_b} \quad x_{ed}' = 0.174571$$

Активное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси в Ом:

$$R_{ed} \equiv \frac{X_{ed}'}{\omega_b \cdot T_{do}'} \quad R_{ed} = 0.224637$$

в относ. ед.:

$$r_{ed} \equiv \frac{R_{ed}}{Z_b} \quad r_{ed} = 0.029246$$

Реактивное сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси в Ом:

$$X_{aq} \equiv X_q - X_s \quad X_{eq} \equiv \frac{X_{aq}^2}{X_q - X_q''} \quad X_{eq} = 2.309774$$

в относ. ед.:

$$x_{eq} \equiv \frac{X_{eq}}{Z_b} \quad x_{eq} = 0.300715$$

Сверхпереходное сопротивление индуктивной демпферной обмотки по поперечной оси в Ом:

$$X_{eq}'' \equiv X_{eq} - \frac{X_{aq}^2}{X_q} \quad X_{eq}'' = 0.805121$$

в относ. ед.:

$$x_{eq}'' \equiv \frac{X_{eq}''}{Z_b} \quad x_{eq}'' = 0.104821$$

Активное сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси в Ом:

$$R_{eq} \equiv \frac{X_{eq}''}{\omega_b \cdot T_{q}''} \quad R_{eq} = 0.170852$$

в относ. ед.:

$$r_{eq} \equiv \frac{R_{eq}}{Z_b} \quad r_{eq} = 0.022244$$

### ***Остальные параметры***

$$D \equiv x_d \cdot x_f \cdot x_{ed} - x_{ad}^2 \cdot (x_d + x_f + x_{ed}) + 2 \cdot x_{ad}^3 \quad D = 0.010065$$

$$x_d'' \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_{ed} - x_{ad}^2} \quad x_d'' = 0.110753$$

$$x_f'' \equiv \frac{D}{x_d \cdot x_{ed} - x_{ad}^2} \quad x_f'' = 0.178530$$

$$x_{ed}'' \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_d - x_{ad}^2} \quad x_{ed}'' = 0.110825$$

$$x_{ded}'' \equiv \frac{D}{x_f \cdot x_{ad} - x_{ad}^2} \quad x_{ded}'' = 0.183340$$

$$x_{fed}'' \equiv \frac{D}{x_d \cdot x_{ad} - x_{ad}^2} \quad x_{fed}'' = 0.390375$$

$$x_{fd}'' \equiv \frac{D}{x_{ed} \cdot x_{ad} - x_{ad}^2} \quad x_{fd}'' = 0.389737$$

$$x_{ed} = 0.442767$$

$xq \equiv \frac{Xq}{Zb}$	$xaq \equiv \frac{(Xq - Xs)}{Zb}$	$xq = 0.318972$	$xaq = 0.249970$
$xq'' \equiv \frac{xq \cdot xeq - xaq^2}{xeq}$			$xq'' = 0.111184$
$xqeq'' \equiv \frac{xq \cdot xeq - xaq^2}{xaq}$			$xqeq'' = 0.133756$
Неприведенное сопротивление обмотки возбуждения в Ом:	$Rf2 \equiv \frac{Uvn}{Ivn}$		$Rf2 = 0.888889$
Коэффициент приведения сопротивления:	$Kr \equiv \frac{Rf}{Rf2}$		$Kr = 0.006201$
Коэффициент приведения тока:	$Ki \equiv \sqrt{\frac{3 \cdot Kr}{2}}$		$Ki = 0.096447$
Коэффициент приведения напряжения:	$Ku \equiv \frac{Kr}{Ki}$		$Ku = 0.064298$
Напряжение возбуждения приведенное к статору: в относ. ед.:	$Uf \equiv Uvn \cdot Ku$		$Uf = 15.431476$
	$uf0 \equiv \frac{Uf}{Ub}$		$uf0 = 0.003150$
Максимальное напряжение форсировки, приведенное	$ufm \equiv Uvm \cdot \frac{Ku}{Ub}$		$ufm = 0.004725$
Добавочное сопротивление обмотки возбуждения:	$rfd \equiv Rdob \cdot \frac{Kr}{Zb}$		$rfd = 0.001292$
Относительное активное сопротивление статора:	$ra \equiv \frac{1.32 \cdot R15}{Zb}$		$ra = 0.009452$
Относительный номинальный момент нагрузки:	$Mcno \equiv \frac{\frac{Pn}{\Omega b}}{Mb}$		$Mcno = 0.853437$

$xd = 0.442654$     $xq = 0.318972$     $xad = 0.373652$     $xaq = 0.249970$    **В о.е.**

$xed = 0.442767$     $xeq = 0.300715$     $xf = 0.520574$     $rf = 0.000718$

$red = 0.029246$     $req = 0.022244$

$k01 := \frac{1}{xed}$

$k01 = 2.258523$

$k02 := \frac{xad}{xed}$

$k02 = 0.843902$

$k_{03} := x_{ad} - x_{ad} \cdot k_{02}$	$k_{03} = 0.058326$
$k_{04} := x_f - x_{ad} \cdot k_{02}$	$k_{04} = 0.205248$
$k_{05} := x_{ad} \cdot k_{01}$	$k_{05} = 0.843902$
$k_{06} := \frac{1}{k_{04}}$	$k_{06} = 4.872159$
$k_{07} := \frac{k_{03}}{k_{04}}$	$k_{07} = 0.284175$
$k_{08} := \frac{k_{05}}{k_{04}}$	$k_{08} = 4.111627$
$k_{09} := k_{01} + k_{02} \cdot k_{08}$	$k_{09} = 5.728334$
$k_{010} := k_{02} - k_{02} \cdot k_{07}$	$k_{010} = 0.604087$
$k_{011} := k_{02} \cdot k_{06}$	$k_{011} = 4.111627$
$k_{012} := x_d - x_{ad} \cdot (k_{07} + k_{010})$	$k_{012} = 0.110753$
$k_{013} := x_{ad} \cdot (k_{06} - k_{011})$	$k_{013} = 0.284175$
$k_{014} := x_{ad} \cdot (k_{08} - k_{09})$	$k_{014} = -0.604087$
$k_{015} := r_f \cdot k_{06}$	$k_{015} = 0.003497$
$k_{016} := r_f \cdot k_{07}$	$k_{016} = 0.000204$
$k_{017} := r_f \cdot k_{08}$	$k_{017} = 0.002951$
$k_{018} := r_{ed} \cdot k_{09}$	$k_{018} = 0.167532$
$k_{019} := r_{ed} \cdot k_{010}$	$k_{019} = 0.017667$
$k_{020} := r_{ed} \cdot k_{011}$	$k_{020} = 0.120249$

$$k_{021} := \frac{req}{xeq}$$

$$k_{021} = 0.073969$$

$$k_{022} := \frac{req \cdot xaq}{xeq}$$

$$k_{022} = 0.018490$$

$$k_{023} := \frac{1}{xeq}$$

$$k_{023} = 3.325405$$

$$k_{024} := \frac{xaq}{xeq}$$

$$k_{024} = 0.831250$$

$$k_{025} := xq - xaq \cdot k_{024}$$

$$k_{025} = 0.111184$$

$$k_{026} := xaq \cdot k_{023}$$

$$k_{026} = 0.831250$$

$$\frac{1}{ra} = 105.798001$$

$$T_{dd} := \frac{k_{012}}{ra \cdot 1}$$

$$T_{dd} = 11.717490$$

$$T_{qq} := \frac{k_{025}}{ra \cdot 1}$$

$$T_{qq} = 11.763085$$

$$T_{mm} := Jd \cdot \frac{\omega b^2}{Mb \cdot p}$$

Jm

$$T_{mm} = 1033.6683636$$

$$\frac{ufm}{uf0} = 1.500000$$

$$\frac{10}{1.5} = 6.666667$$

$$k_{\pi} := \frac{ufm \cdot Ub}{10}$$

$$\frac{10}{Ub \cdot 1} = 0.002041$$

$$k_{\pi} = 2.314721$$

Коэффициент преобразователя

$$T_{\mu} := \frac{0.05}{tb}$$

$$0.001361$$

$$T_{\mu} = 15.707963$$

Постоянная времени преобр., о.е.

$$k_{id} := \frac{5}{0.6 \cdot Ub}$$

$$k_{id} = 0.001701$$

Зворотній зв'язок за струмом id

$$y := \frac{2 \cdot k_{\pi} \cdot k_{013} \cdot k_{id}}{ra}$$

$$y = 0.236758$$

$$k_p := \frac{T_{dd}}{y \cdot T_{\mu}}$$

Ku

$$k_p = 3.150721$$

Пропорциональная часть регулятора

$$k_i := \frac{1}{y \cdot T_{\mu}}$$

Ki

$$k_i = 0.268890$$

Интегральная часть регулятора

$$k_{zi} := k_{015}$$

$$k_{zi} = 0.003497$$

усиление задатчика интенсивности