

Восемнадцатая ежегодная международная
научно-техническая конференция
студентов и аспирантов
"РАДИОЭЛЕКТРОНИКА,
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА"



Кафедра ФЭМАЭК

Тема работы:

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИНДУКЦИОННО-ДИФФУЗИОННОЙ ПЕЧИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОГО УРОВНЯ РАСПЛАВА В ТИПЕ

Разработали студенты группы ЭЛ-02:

Алферова Е.С.

Хахалина Е.В.

Научный руководитель: к.т.н. Федин М.А. ₁

Цель исследования

Целью работы является разработка структурной схемы системы регулирования тока и мощности индукционной тигельной печи, в которой будет учитываться изменение уровня расплава в индукционной тигельной печи (ИТП) и индукционном тигельном миксере (ИТМ).

Для достижения поставленной цели необходимо провести анализ электрических режимов работы ИТП (ИТМ) при различном заполнении тигля с использованием программы *Overheat*. Эти расчеты учтены в модели, реализованной в пакете программ *Simulink*.



Общие вопросы управления установками индукционного нагрева

Индукционный нагрев применяется во многих областях обработки металлов: в печах для плавки черных и цветных металлов как на воздухе, так и в вакууме, в установках для нагрева под горячую обработку и т.д. В настоящее время используются установки емкостью от десятков грамм до десятков тонн.

Системы управления индукционными установками существенно различаются в зависимости от решаемых технологических задач.

Наиболее сложными с точки зрения задач управления являются индукционные тигельные печи и индукционные тигельные миксеры

Основная цель управления индукционными установками – обеспечение максимальной производительности печи.

Управление ИТП (или ИТМ) осуществляется с помощью регулятора мощности (или тока), регулятора коэффициента мощности ($\cos\varphi$) и регулятора симметрирования.

Обзор работ, в которых ранее рассматривались вопросы управления индукционными установками

Проблемы связанные с управлением электрическими параметрами индукционных тигельных печей затронуты в достаточно широком круге работ:

Минеев А. Р., Коробов А.И., Погребисский М.Я. Моделирование электротехнологических процессов и установок // «Компания Спутник+», 2004.

Кувалдин А.Б., Федин М.А. Расчет тепловых и электрических характеристик ИТМ // Электрометаллургия, 2007.

Кувалдин А.Б., Погребисский М.Я., Федин М.А. Разработка системы управления температурой расплава в индукционных тигельных миксерах и ее исследование с использованием компьютерной модели.//Электрометаллургия,2008.

Гитгарц Д.А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ // Энергоатомиздат, 1984.

Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи // «Энергия», 1967.

Погребисский М.Я. Методическое пособие по курсу «Автоматическое управление электротехнологическими установками» // Издательство МЭИ, 2001.

Упрощенная структурная модель ИТП (ИТМ)

Индукционная тигельная установка в традиционных моделях регуляторов мощности(тока), регулятора $\cos\varphi$ и симметрирования, рассматривается как безынерционное звено с коэффициентом передачи $K=1/R$, где R – активное эквивалентное электрическое сопротивление системы «индуктор – нагрузка», которое считается постоянной величиной (рис. 1).



Рис. 1. Структурная модель ИТП (ИТМ) в среде *Simulink*

Блок-схема модели регулятора тока ИТП (или ИТМ) в среде *Simulink*, без учета переменного уровня расплава в тигле

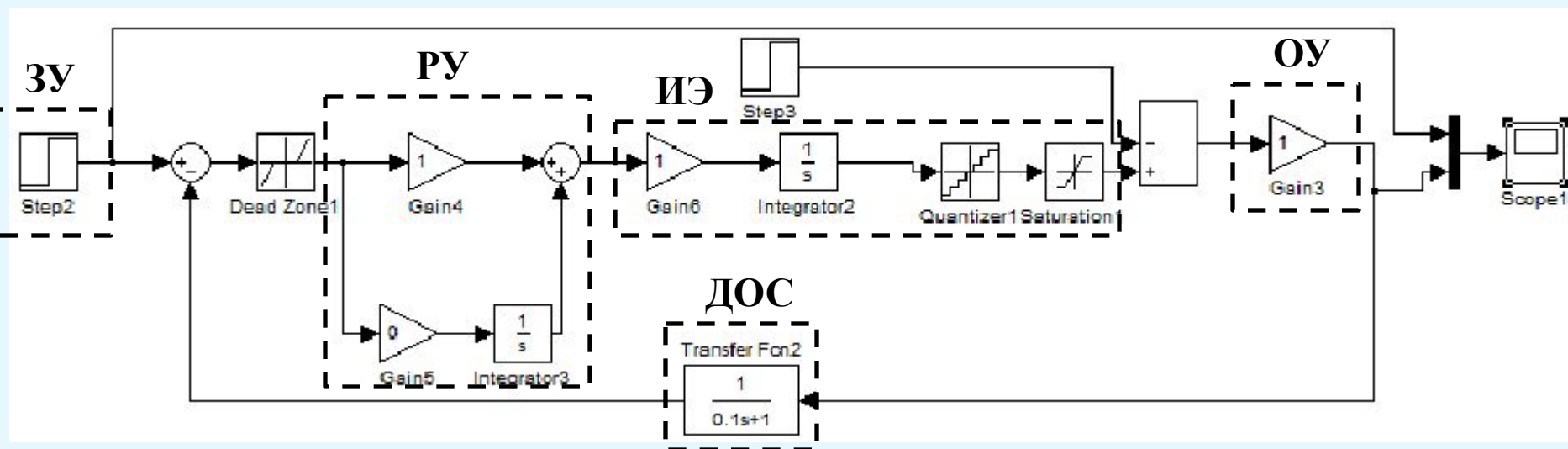


Рис. 2. Блок-схема модели регулятора тока ИТП в среде *Simulink*

- ЗУ – задающее устройство
- РУ – регулирующее устройство
- ИЭ – исполнительный элемент
- ОУ – объект управления
- ДОС – датчик обратной связи

Элементы входящие в состав блок-схемы модели регулятора тока ИТП (или ИТМ) в среде *Simulink* без учета переменного уровня расплава в тигле



– генератор ступенчатого сигнала

Назначение:

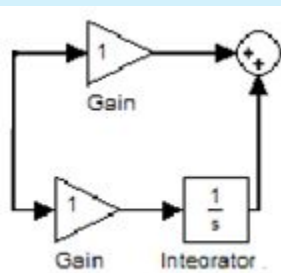
Формирует ступенчатый сигнал. В данной схеме ток уставки.



– блок с зоной нечувствительности Dead Zone

Назначение:

Реализует нелинейную зависимость типа "зона нечувствительности (мертвая зона)".



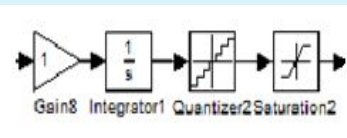
– пропорционально-интегральный регулятор

Назначение:

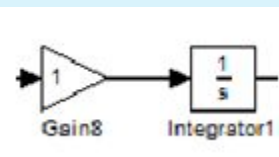
Предназначен для регулирования тока в индукторе.

И-составляющая нужна для устранения статической ошибки, которая характерна для пропорционального регулятора. В исследуемой модели статическая ошибка определяется не порядком астатизма, а существующей нелинейностью системы, поэтому И-составляющая равна нулю.

Элементы входящие в состав блок-схемы модели регулятора тока ИТП (или ИТМ) в среде *Simulink* без учета переменного уровня расплава в тигле



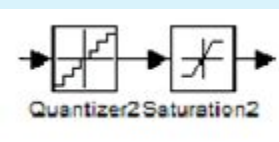
– источник питания. Электропечной трансформатор



- Gain – скалярный коэффициент передаточной функции
- Integrator – интегрирующий блок

Назначение:

Блок gain реализует переход от круговой скорости к линейной, а блок integrator реализует переход от линейной скорости к перемещению ползунка электропривода печного трансформатора.



- Quantizer – блок квантования по уровню

Назначение:

Блок обеспечивает квантование входного сигнала с одинаковым шагом по уровню

- Saturation – блок ограничения

Назначение:

Выполняет ограничение величины сигнала



Исходные данные для моделирования

Табл.1. Исходные данные

| Кр | Ко | Umax | Кдт | Тдт |
|----|----|------|-----|-----|
| 1 | 1 | 1.2 | 1 | 0.1 |

Кр – коэффициент усиления ПСН

Ко – коэффициент усиления ИТП

Umax – ограничение напряжения

Кдт – коэффициент усиления датчика тока

Тдт – постоянная времени датчика тока

Исследование регулятора тока ИТП

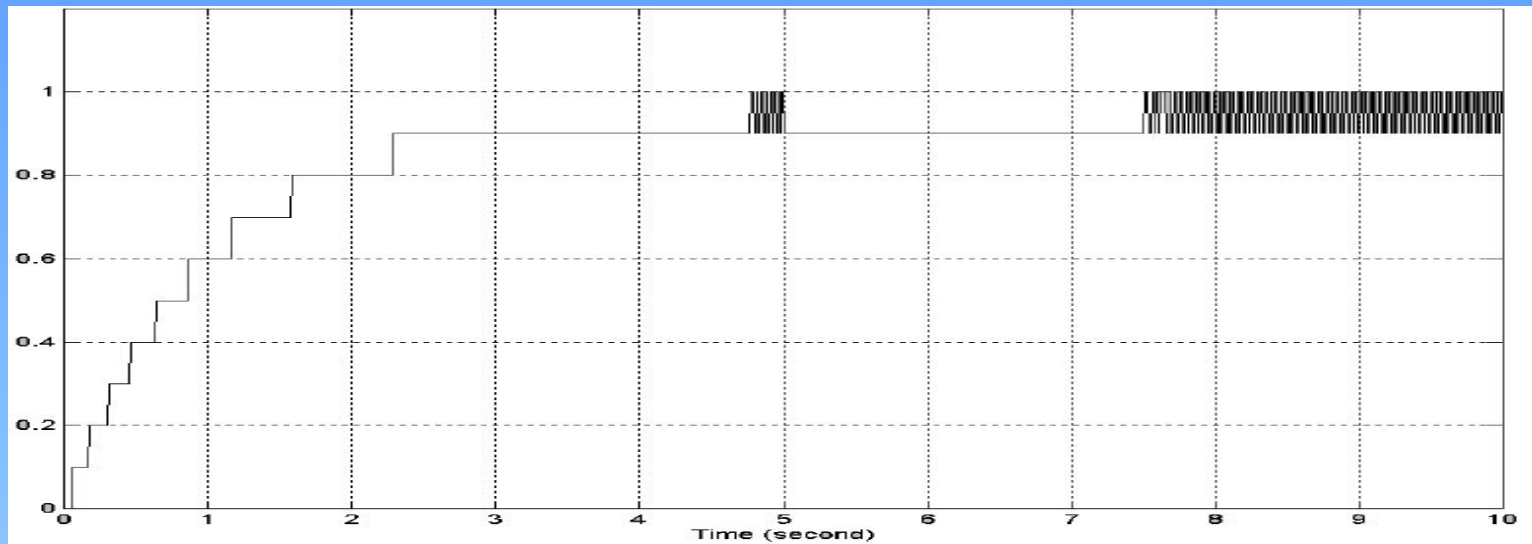


Рис. 3. График переходного процесса тока без блока с зоной нечувствительности

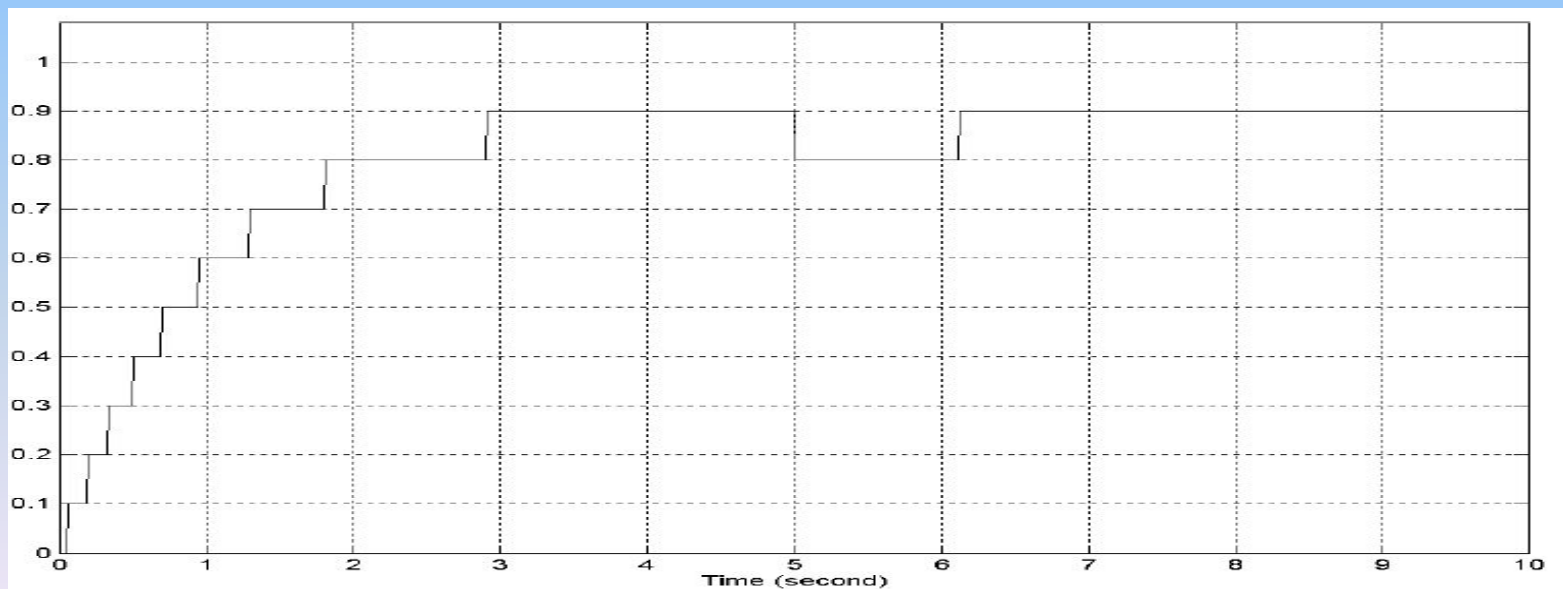
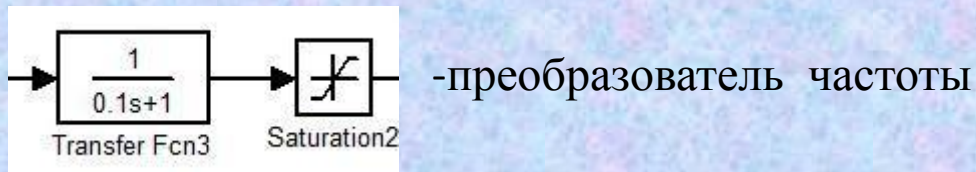


Рис. 4. График переходного процесса тока с блоком с зоной нечувствительности

Исследование системы автоматического регулирования тока ИТП с преобразователем частоты в качестве источника питания

Помимо ПСН в качестве источника питания ИТП (ИТМ) используются электромеханические или статические (тиристорные или транзисторные) преобразователи частоты (ПЧ). Это целесообразно для среднечастотных установок. Передаточную функцию ПЧ можно представить в виде инерционного звена 1 порядка. Последовательно к нему ставится звено ограничения, как и для любых источников питания ограниченной мощности.



Постоянная времени преобразователя зависит от его инерционности и принимается равной 0.1-0.5, в данном случае принимается постоянная времени, равная 0.1.

Переходные процессы САУ при ПЧ в качестве источника питания

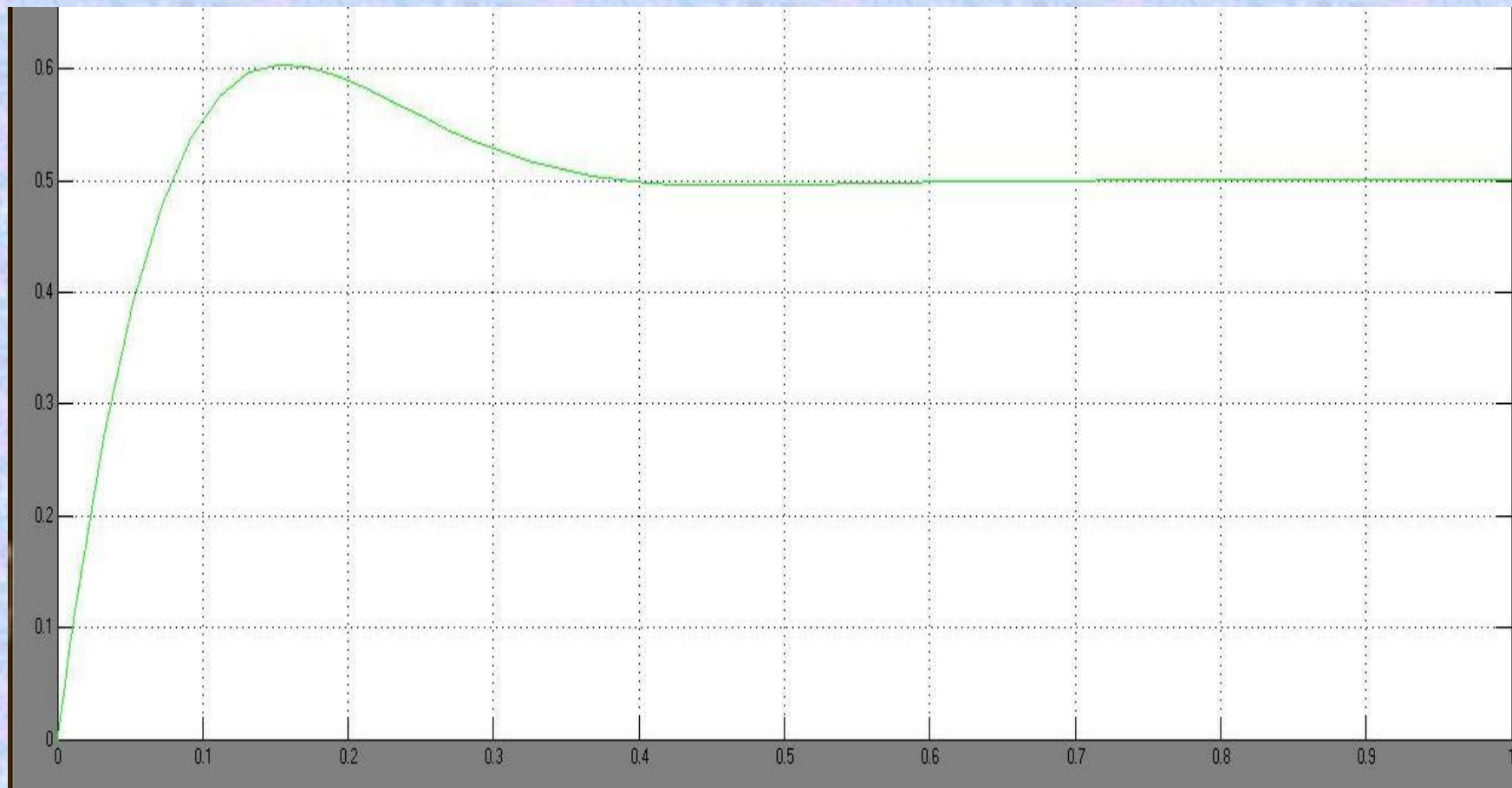


Рис 5. Переходной процесс тока при ПЧ в качестве источника питания.

Влияние зоны нечувствительности(ЗН) на точность САУ

Табл.2. Зависимость статической ошибки от величины ЗН.

| | | | | | |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\delta_{ЗН}$, о. е. | ± 0.01 | ± 0.02 | ± 0.03 | ± 0.05 | ± 0.07 |
| $\Delta_{ст}$, о. е. | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.07 |

Из табл.1 следует, что введение ЗН улучшает устойчивость системы, но вносит статическую ошибку.



Идентификация ИТП (или ИТМ) как объекта управления с учетом переменного уровня расплава с тигле

В процессе работы ИТМ, уровень расплава изменяется в широком диапазоне(от 100% до 20%). Это оказывает влияние на параметры тепловых и электрических режимов его работы(изменение эквивалентных активного и индуктивного сопротивлений системы «индуктор – нагрузка», потребляемой и полезной мощности).

Для реализации структурной схемы системы регулирования, которая будет учитывать изменения R (рис. 9), получим функциональную зависимость R от высоты расплава в тигле l . Для этого проведем анализ электрических режимов работы ИТМ при различном заполнении тигля с использованием программы *Overheat*.

Использование программы *Overheat* для получения значений электрических параметров ИТМ (с использованием аналитического метода Слухоцкого А.Е.)

The screenshot shows a software window titled "Расчет индукционного тигельного миксера (по методике А.Е. Слухоцкого)". The interface is divided into two main sections: "Исходные данные:" (Initial data) and "Просмотр результатов расчета:" (View calculation results).

Исходные данные:

- Металл: Чугун (dropdown menu)
- Емкость, т: 1 (text input)
- Мощность, кВт: 170 (text input)
- Вспомогательное время, ч: 0.17 (text input)
- Число смен: 2 (text input)
- Вариант исходных данных: 1-й вариант исходных данных (dropdown menu)
- Наличие магнитопровода: (checkbox)
- Материал индуктора: Медь (dropdown menu)
- Кoeffициент заполнения: 0.9 (text input)

Просмотр результатов расчета:

- Предварительный расчет (button)
- Геометрический расчет (button)
- Электрический расчет (button)
- Тепловой расчет (button)
- Выбор частоты тока и оборудования (button)
- Расчет (button)
- Создать отчет (button)
- Назад (button)

Additional text: Диаметр, на котором расположены пакеты магнитопровода (Dм), м: 1.1 (text input)

Рис. 6. Окно с исходными данными для расчета ИТМ (с использованием аналитического метода Слухоцкого А.Е.)

Использование программы *Overheat* для получения значений электрических параметров ИТМ (с использованием численного метода индуктивно-связанных контуров)

Анализ электрических режимов работы методом индуктивно-связанных контуров

Исходные данные

Диаметр индуктора, м: 0,683

Диаметр загрузки, м: 0,501

Высота индуктора, м: 0,883

Высота загрузки (полный миксер), м: 0,736

Заглубление загрузки, м: 0,0735

Ширина токоведущего сечения трубки индуктора, м: 0,0039

Ток индуктора, А: 2600

Напряжение на индукторе, В: 500

Частота, Гц: 500

Удельное зл. сопротивление материала индуктора, Ом*м: 2E-8

Удельное зл. сопротивление материала загрузки, Ом*м: 1,26E-6

Число витков индуктора: 41

Коэффициент заполнения: 0,9

Заполнение миксера, %: 100

Цветом отмечены параметры, не соответствующие проведенному ранее расчету миксера.

Заглубление загрузки рассчитано исходя из предположения о симметричном расположении загрузки относительно индуктора в направлении продольной оси.

Все размеры на эскизах приведены в мм.

Величины, связанные с дискретизацией расчетной области, измеряются относительно глубины проникновения тока в материал загрузки.

Эскиз системы индуктор-загрузка
Области загрузки:

- 1 - верхний торцевой слой загрузки
- 2 - боковой слой загрузки
- 3 - нижний торцевой слой загрузки

Сечение трубки индуктора

Глубина проникновения тока в материал индуктора, м: 0,003

Глубина проникновения тока в материал загрузки, м: 0,025

Дискретизация расчетной области

Индуктор

Число разбиений витка индуктора по r: 4

Число разбиений витка индуктора по z: 4

Загрузка

1-я область

Размер области по r: 3

Размер области по z: 1,5

Минимальный размер дискр. сетки по r: 0,2

Коэффициент увеличения шага по r: 1,1

Минимальный размер дискр. сетки по z: 0,2

Коэффициент увеличения шага по z: 1,3

2-я область

Размер области по r: 3

Число разбиений области по z: 20

Минимальный размер дискр. сетки по r: 0,2

Коэффициент увеличения шага по r: 1,2

3-я область

Размер области по r: 3

Размер области по z: 1,5

Минимальный размер дискр. сетки по r: 0,2

Коэффициент увеличения шага по r: 1,1

Минимальный размер дискр. сетки по z: 0,2

Коэффициент увеличения шага по z: 1,3

Close

Рис. 7. Окно с исходными данными для расчета ИТМ (с использованием численного метода индуктивно-связанных контуров)

Результаты серии вычислительных экспериментов (аналитический расчет)

Табл. 3. Зависимость $R(l)$ для ИТМ емкостью 1т.

| $l, \%$ | Миксер номинальной емкостью 1 т. | | | |
|-----------------|----------------------------------|-------|-------|-------|
| | 100% | 75% | 50% | 25% |
| $R, \text{ Ом}$ | 0,081 | 0,076 | 0,068 | 0,048 |
| $X, \text{ Ом}$ | 0,806 | 0,888 | 0,989 | 1,116 |
| $Z, \text{ Ом}$ | 0,810 | 0,892 | 0,992 | 1,117 |
| $\cos\varphi$ | 0,111 | 0,085 | 0,066 | 0,043 |

В результате аппроксимации результатов получены зависимости R от l и Z от l :

$$\mathbf{R = 0,024 \cdot \ln(l) - 0,028 \text{ и } Z = -0,21 \cdot \ln(l) + 1,83}$$

Величина достоверности аппроксимации: $R^2 = 0,98$

Табл. 4. Зависимость $R(l)$ для ИТМ емкостью 2,5т.

| $l, \%$ | Миксер номинальной емкостью 2,5 т. | | | |
|-----------------|------------------------------------|-------|-------|-------|
| | 100% | 75% | 50% | 25% |
| $R, \text{ Ом}$ | 0,025 | 0,023 | 0,020 | 0,014 |
| $X, \text{ Ом}$ | 0,111 | 0,121 | 0,134 | 0,148 |
| $Z, \text{ Ом}$ | 0,114 | 0,124 | 0,135 | 0,149 |
| $\cos\varphi$ | 0,221 | 0,186 | 0,145 | 0,094 |

В результате аппроксимации результатов получена зависимость R от l и Z от l :

$$\mathbf{R = 0,0074 \cdot \ln(l) - 0,0087 \text{ и } Z = -0,025 \cdot \ln(l) + 0,23}$$

Величина достоверности аппроксимации: $R^2 = 0,98$

Результаты серии вычислительных экспериментов (аналитический расчет)

Табл. 4. Зависимость $R(l)$ для ИТМ емкостью 6 т.

| $l, \%$ | Миксер номинальной емкостью 6 т. | | | |
|-----------------|----------------------------------|-------|-------|-------|
| | 100% | 75% | 50% | 25% |
| $R, \text{ Ом}$ | 0,027 | 0,026 | 0,023 | 0,017 |
| $X, \text{ Ом}$ | 0,123 | 0,138 | 0,156 | 0,179 |
| $Z, \text{ Ом}$ | 0,126 | 0,140 | 0,157 | 0,179 |
| $\cos\varphi$ | 0,215 | 0,183 | 0,144 | 0,093 |

В результате аппроксимации результатов получена зависимость R от l и Z от l :

$$\mathbf{R = 0,0076 \cdot \ln(l) - 0,0070 \text{ и } Z = -0,038 \cdot \ln(l) + 0,30}$$

Величина достоверности аппроксимации: $R^2 = 0,97$

Табл. 5. Зависимость $R(l)$ для ИТМ емкостью 10 т.

| $l, \%$ | Миксер номинальной емкостью 10 т. | | | |
|-----------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| | 100% | 75% | 50% | 25% |
| $R, \text{ Ом}$ | 0,030 | 0,029 | 0,026 | 0,020 |
| $X, \text{ Ом}$ | 0,126 | 0,143 | 0,165 | 0,195 |
| $Z, \text{ Ом}$ | 0,129 | 0,145 | 0,167 | 0,196 |
| $\cos\varphi$ | 0,227 | 0,196 | 0,156 | 0,100 |

В результате аппроксимации результатов получена зависимость R от l и Z от l :

$$\mathbf{R = 0,0082 \cdot \ln(l) - 0,0064 \text{ и } Z = -0,048 \cdot \ln(l) + 0,35}$$

Величина достоверности аппроксимации: $R^2 = 0,99$

Реализация структурной схемы системы регулирования, учитывающая изменение уровня расплава в тигле

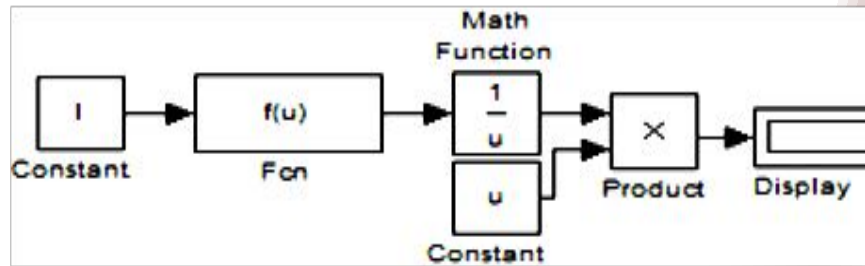


Рис. 8. Структурная модель ИТП (ИТМ) в среде *Simulink*



Блок-схема модели регулятора тока ИТП (или ИТМ) в среде *Simulink* с учетом переменного уровня расплава в тигле ОУ

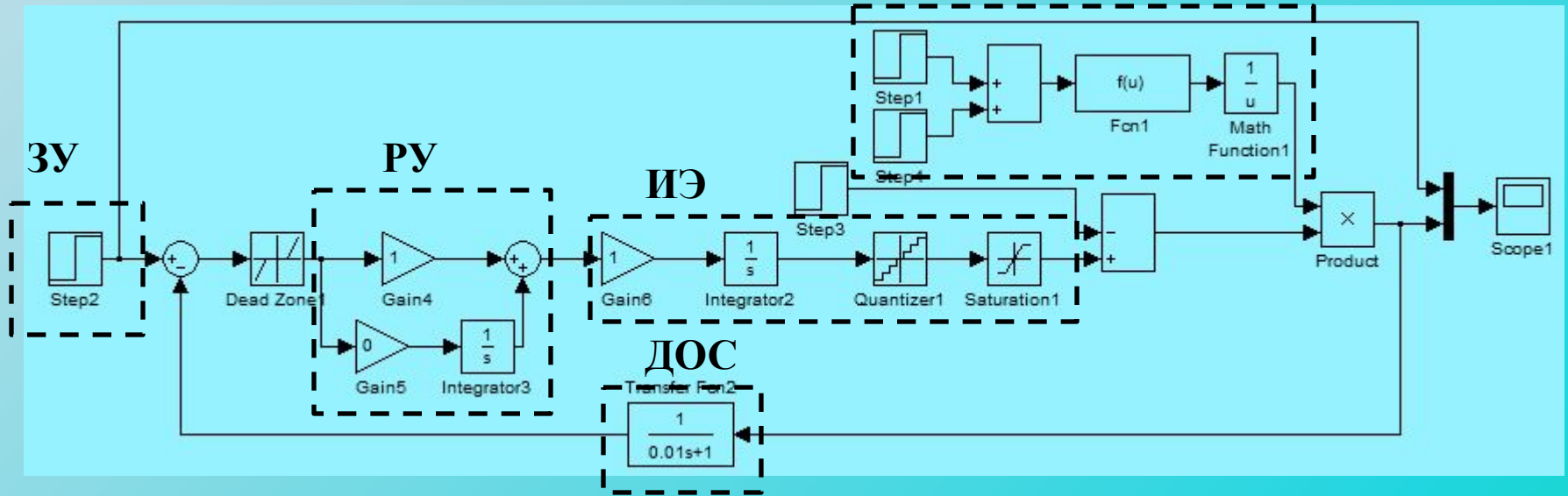


Рис. 9. Блок-схема модели регулятора тока ИТП (или ИТМ) в среде *Simulink* с учетом переменного уровня расплава в тигле

- ЗУ – задающее устройство
- РУ – регулирующее устройство
- ИЭ – исполнительный элемент
- ОУ – объект управления
- ДОС – датчик обратной связи

Исходные данные для моделирования

Для исследования переходных процессов полученной модели рассмотрим тигельный миксер для выдержки и перегрева чугуна перед разливкой ИЧТМ-6М1 и подберем для него электропечной трансформатор.

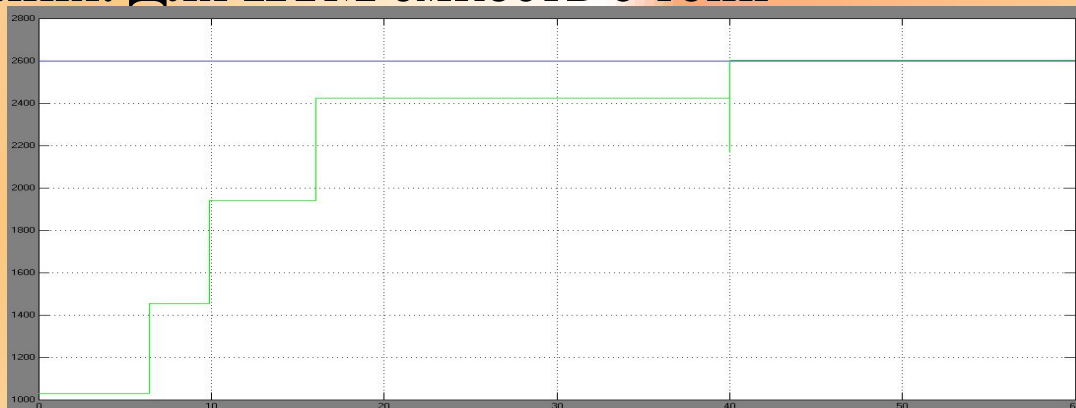
| | | |
|--|---------------|--------------|
| Тип электропечного трансформатора, исходя из потребляемой мощности ИТМ | | ЭОМП-1000/10 |
| Мощность, кВ·А | | 400 |
| Напряжение | первичное, кВ | 6 или 10 |
| | вторичное, В | 510-85 |

Исходные данные для моделирования

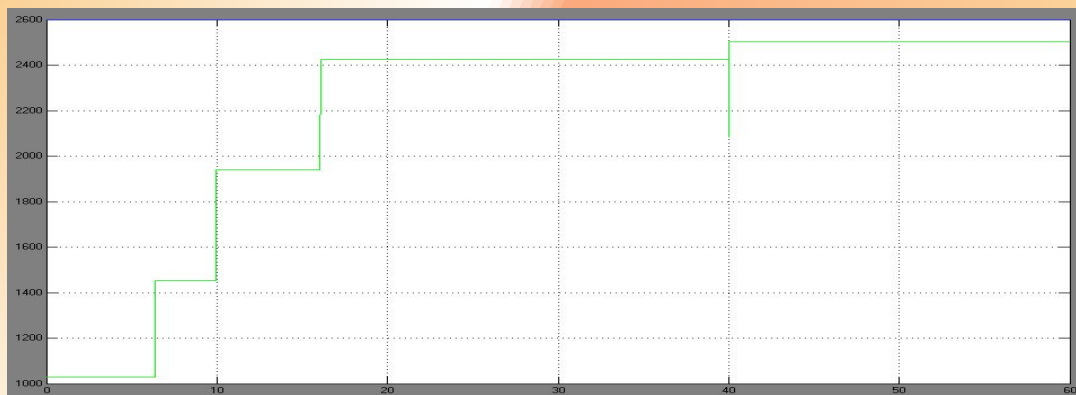
| ЗУ Густавка | РУ | ИЭ | | | | ДОС | |
|----------------|--------|----|----|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | | Кр | Δq | U _{max} | U _{min} | К _{дт} | Т _{дт} |
| 2600 | 0,0010 | 10 | 40 | 510 | 85 | 1 | 0,01 |

Переходные процессы САУ, изменение тока при ПСН в качестве источника питания. Для ИТМ ёмкость 6 тонн

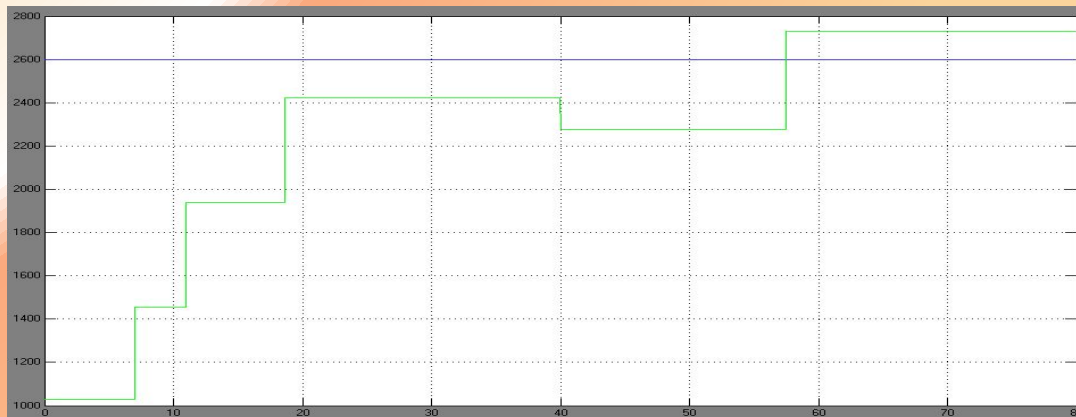
Уровень расплава в тигле
изменяется от 100% до 75%



Уровень расплава в тигле
изменяется от 100% до 50%



Уровень расплава в тигле
изменяется от 100% до 25%



Определение числового значения статической ошибки при различном уровне расплава в тигле

| Изменение уровня расплава в тигле | с 100% до 75% | с 100% до 50% | с 100% до 25% |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Установившееся значение тока | 2635 | 2505 | 2755 |
| Числовое значение статической ошибки | 35 | 95 | 155 |

Зависимость $\Delta_{ст.от I}$



$$\Delta_{ст.} = -2,4 \cdot I + 215$$

$$R^2 = 1$$

Выводы по работе

1. Система автоматического регулирования тока ИТП (ИТМ) является системой второго порядка.
2. Применение ПЧ в качестве источника питания избавляет систему от автоколебаний.
3. Корректировать переходные процессы системы можно введением зоны нечувствительности. При этом в систему вносится статическая ошибка.
4. В процессе работы ИТМ при снижении уровня расплава в тигле уменьшается эквивалентное активное сопротивление системы «индуктор-загрузка», но при этом увеличивается полное эквивалентное сопротивление за счет роста его индуктивной составляющей.
5. При усилении возмущающего воздействия увеличивается значение статической ошибки.



Планы на будущее

Полученные зависимости активного и полного сопротивлений от высоты уровня расплава в тигле планируется использовать при разработке усовершенствованной модели регулирования ИТП для плавки драгоценных металлов, с которой в настоящее время на нашей кафедре проводятся эксперименты.



Основные параметры ИТП для плавки драгоценных металлов

| | |
|----------------------------|---|
| Потребляемая мощность, кВт | 2,5 |
| КПД | Не менее 0,9 |
| Частота, кГц | 22,5 |
| Источник питания | Высокочастотный транзисторный генератор (тиристорный преобразователь частоты) |

Спасибо за внимание!