

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



Кафедра ФЭМАЭК

Тема работы:

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИНДУКЦИОННО-ДИГЕЛНОЙ 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

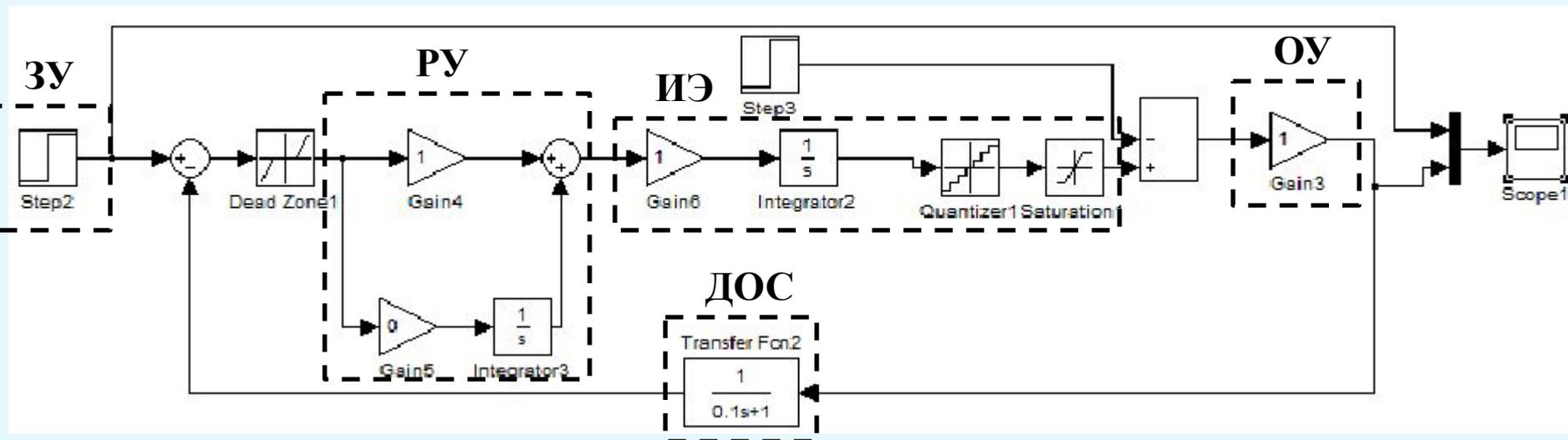


Рис. 2. Блок-схема модели регулятора тока ИТП в среде *Simulink*

- 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:

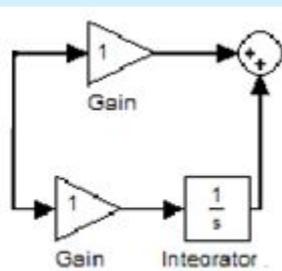
Формирует ступенчатый сигнал. В данной схеме ток уставки.



– блок с зоной нечувствительности Dead Zone

Назначение:

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



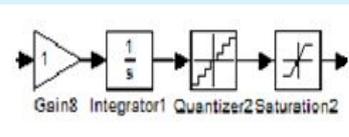
– пропорционально-интегральный регулятор

Назначение:

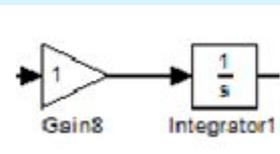
Предназначен для регулирования тока в индукторе.

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



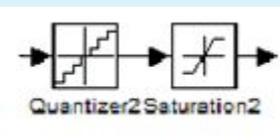
– источник питания. Электропечной трансформатор



- 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

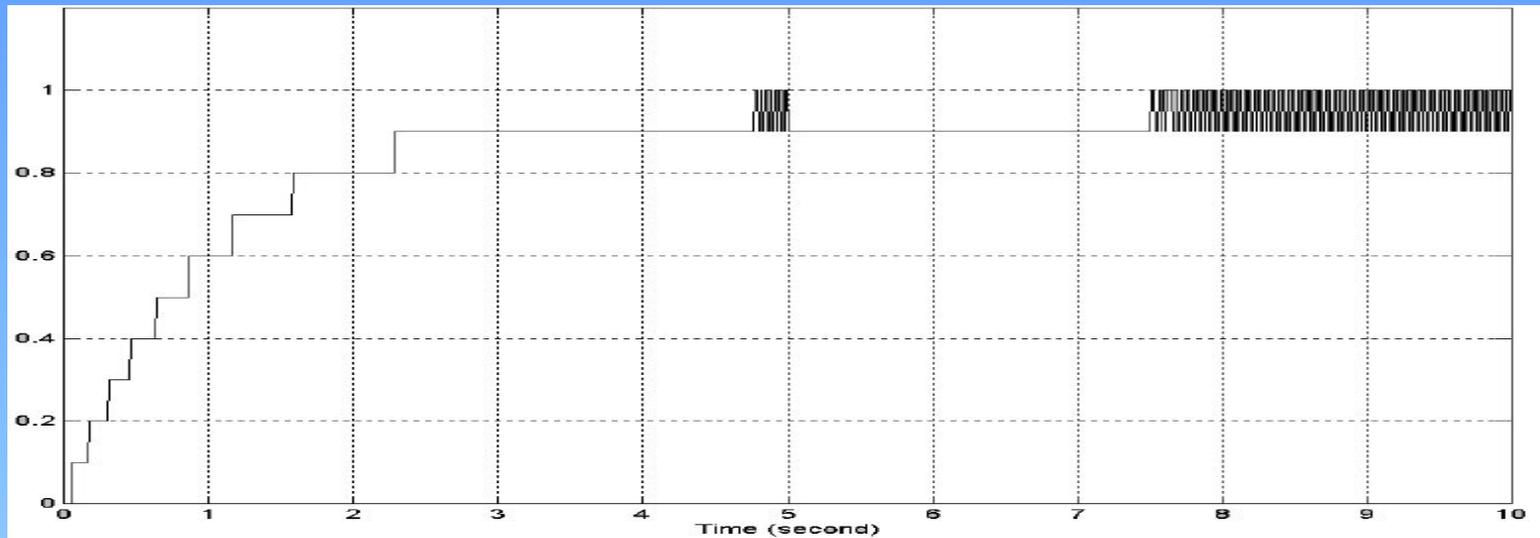


Рис. 3. График переходного процесса тока без блока с зоной нечувствительности

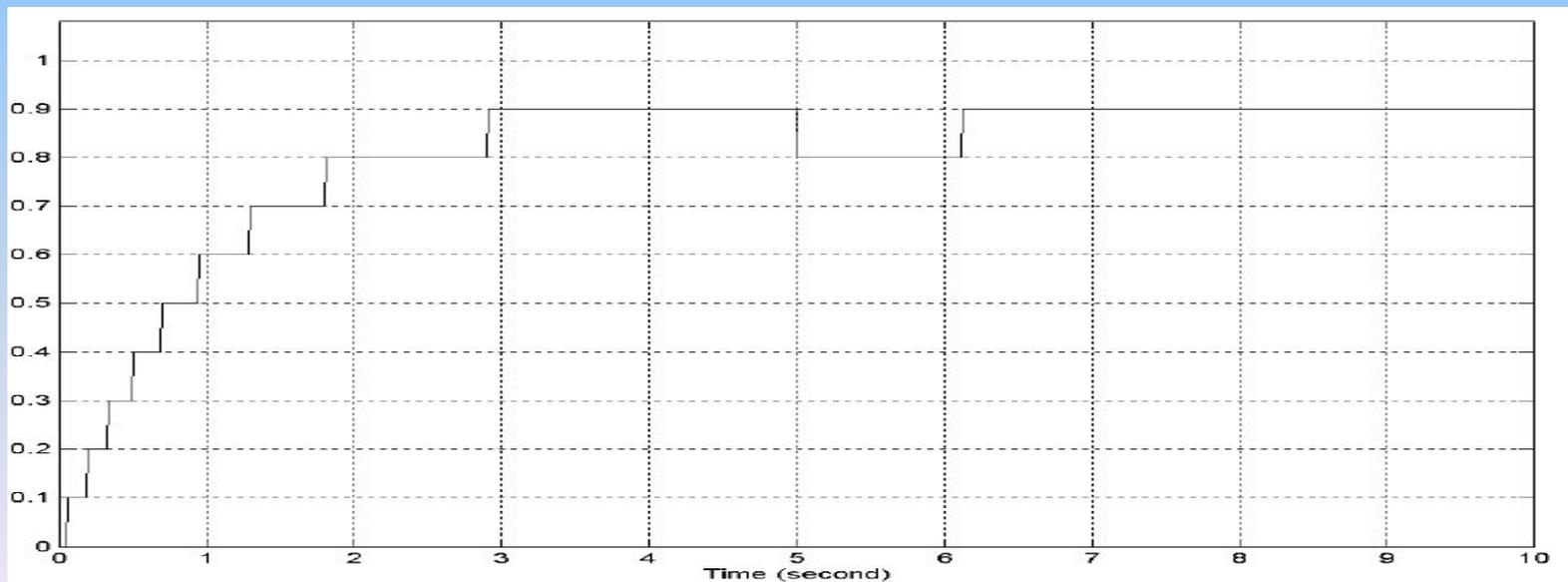


Рис. 4. График переходного процесса тока с блоком с зоной нечувствительности

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

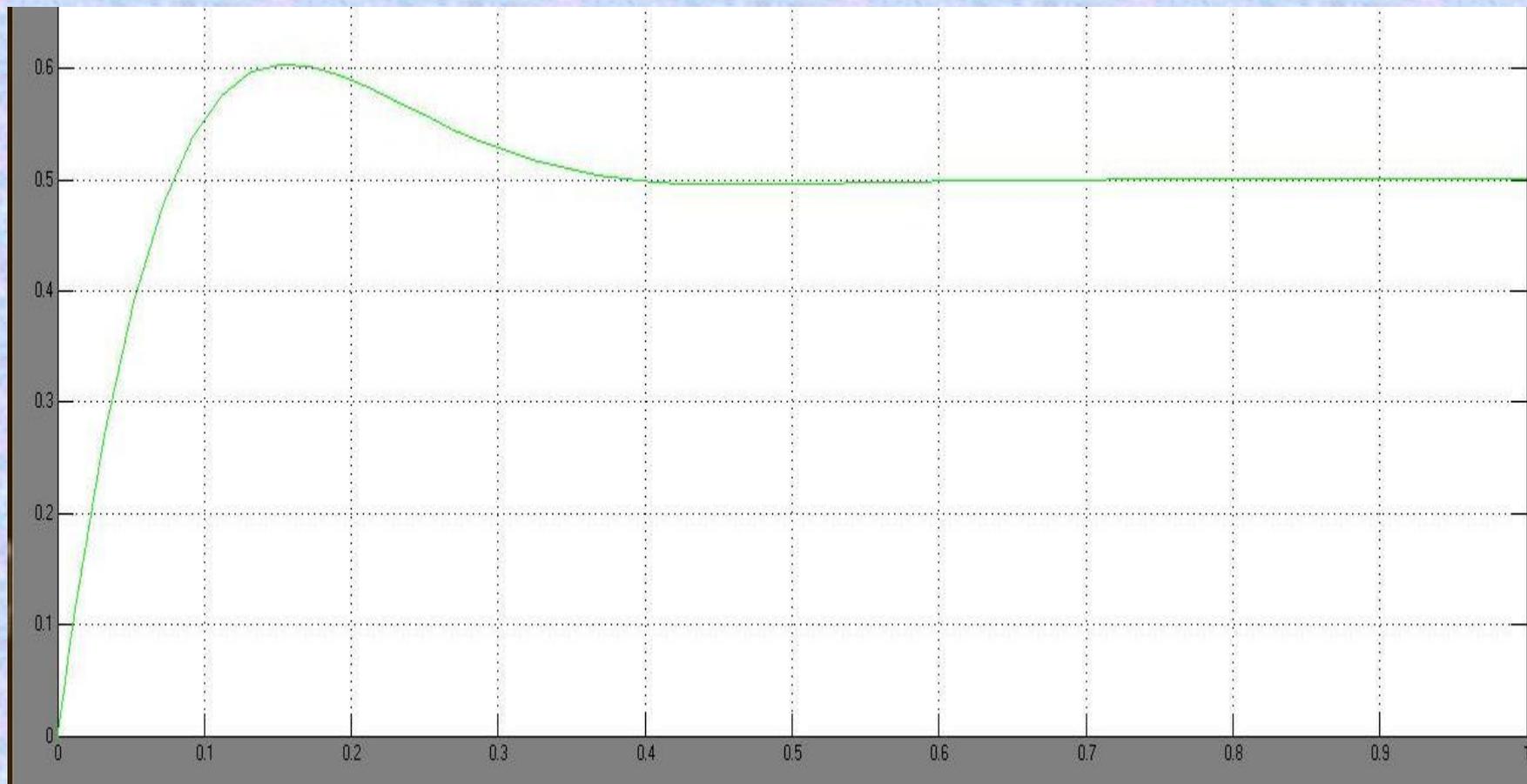


Рис 5. Переходной процесс тока при ПЧ в качестве источника питания.

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)
- Диаметр, на котором расположены пакеты магнитопровода (Dм), м: 1.1 (text input)
- Материал индуктора: Медь (dropdown menu)
- Коэффициент 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)

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

Удельное эл. 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

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

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

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

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

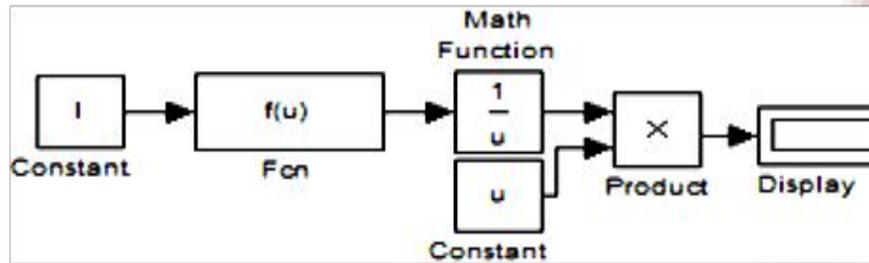


Рис. 8. Структурная модель ИТП (ИТМ) в среде *Simulink*



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

ОУ

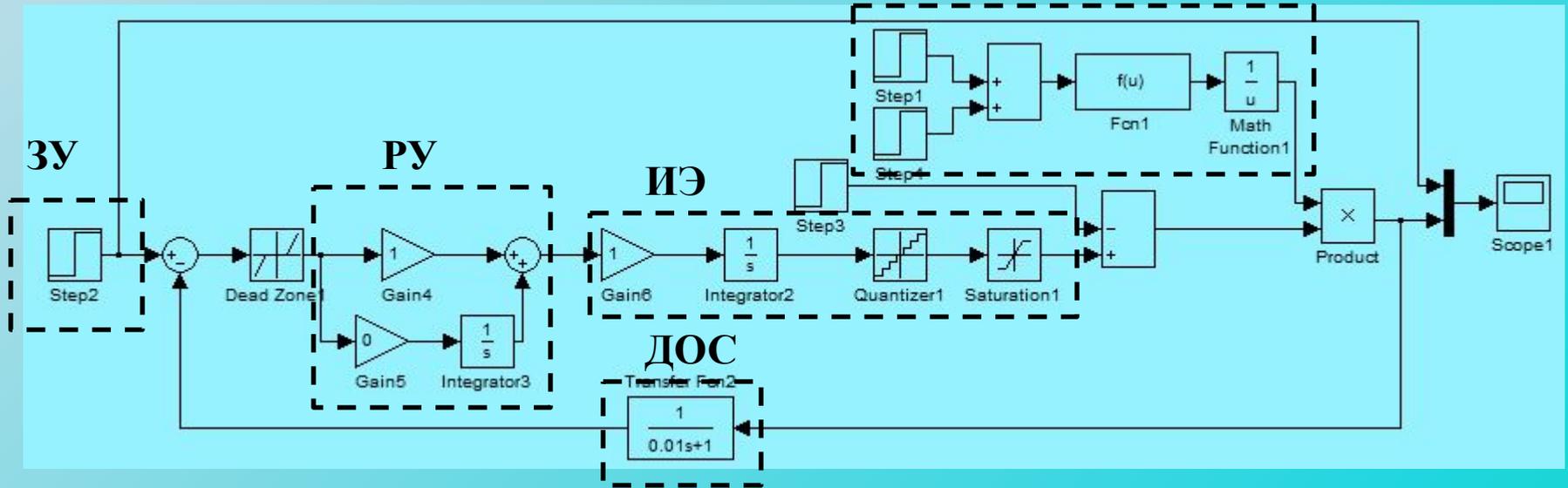


Рис. 9. Блок-схема модели регулятора тока ИТП (или ИТМ) в среде *Simulink* с учетом переменного уровня расплава в тигле

- 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

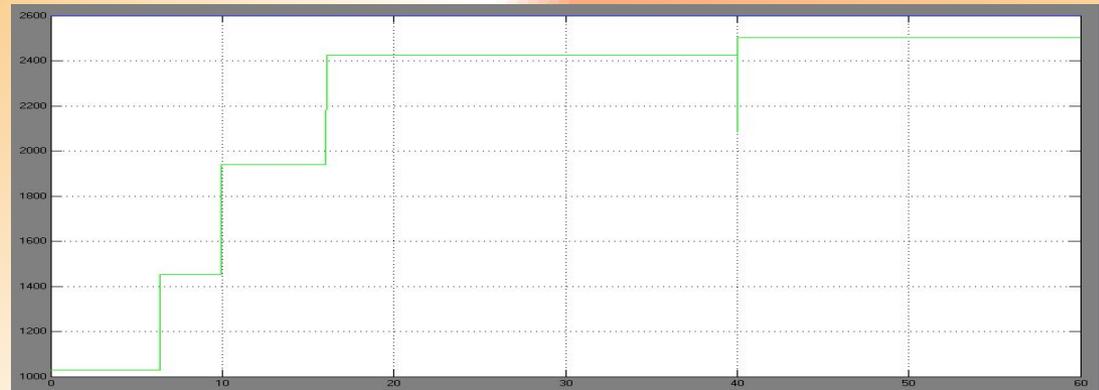
ЗУ Густавка	РУ	ИЭ				ДОС	
		Кр	Δq	U _{max}	U _{min}	К _{дт}	Т _{дт}
2600	0,0010	10	40	510	85	1	0,01

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

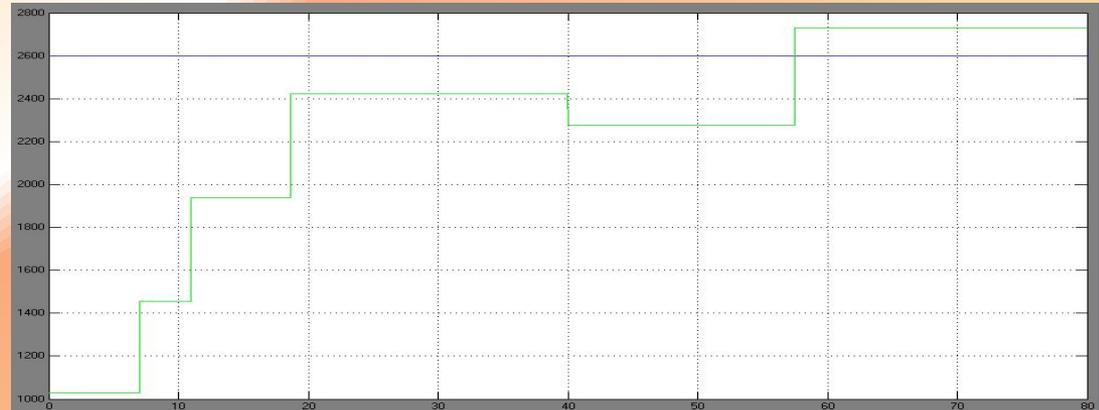
Уровень расплава в тигле
изменяется от 100% до 75%



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!