

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



Кафедра ФЭМАЭК

Тема работы:

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИНДУКЦИОННО-ДИГЕЛЛЬНОЙ 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. <sub>1</sub>

## 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

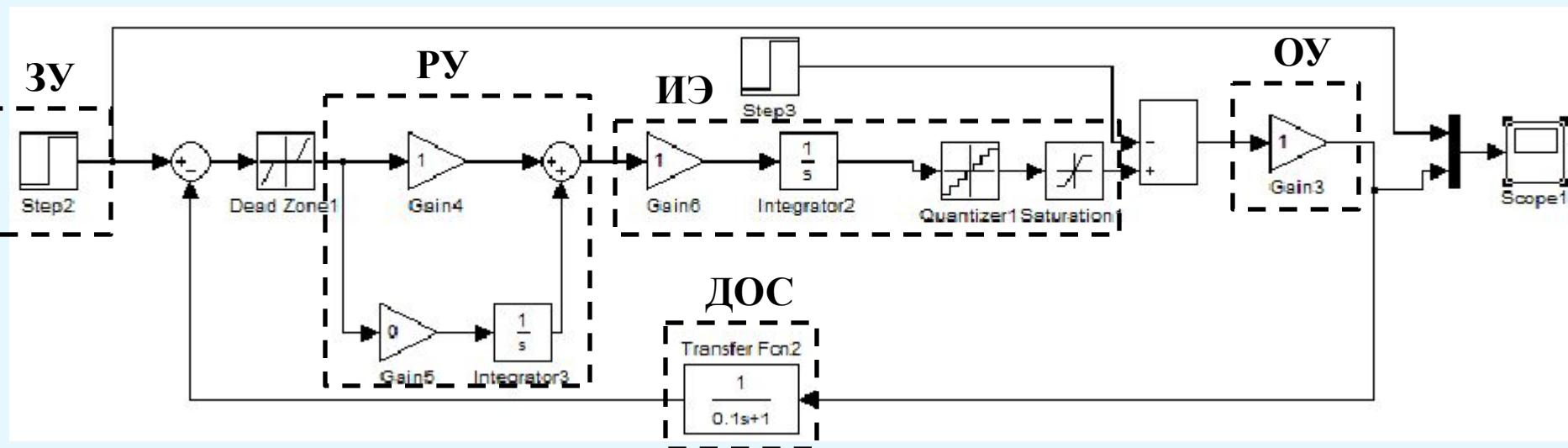


Рис. 2. Блок-схема модели регулятора тока ИТП в среде *Simulink*

- 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:*

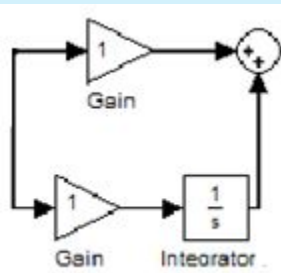
Формирует ступенчатый сигнал. В данной схеме ток уставки.



– блок с зоной нечувствительности Dead Zone

*Назначение:*

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



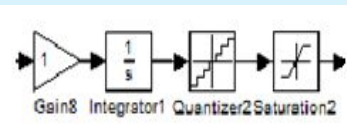
– пропорционально-интегральный регулятор

*Назначение:*

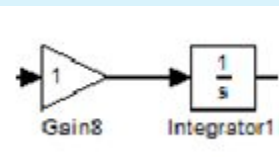
Предназначен для регулирования тока в индукторе.

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



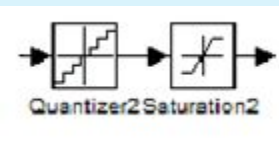
– источник питания. Электропечной трансформатор



- 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

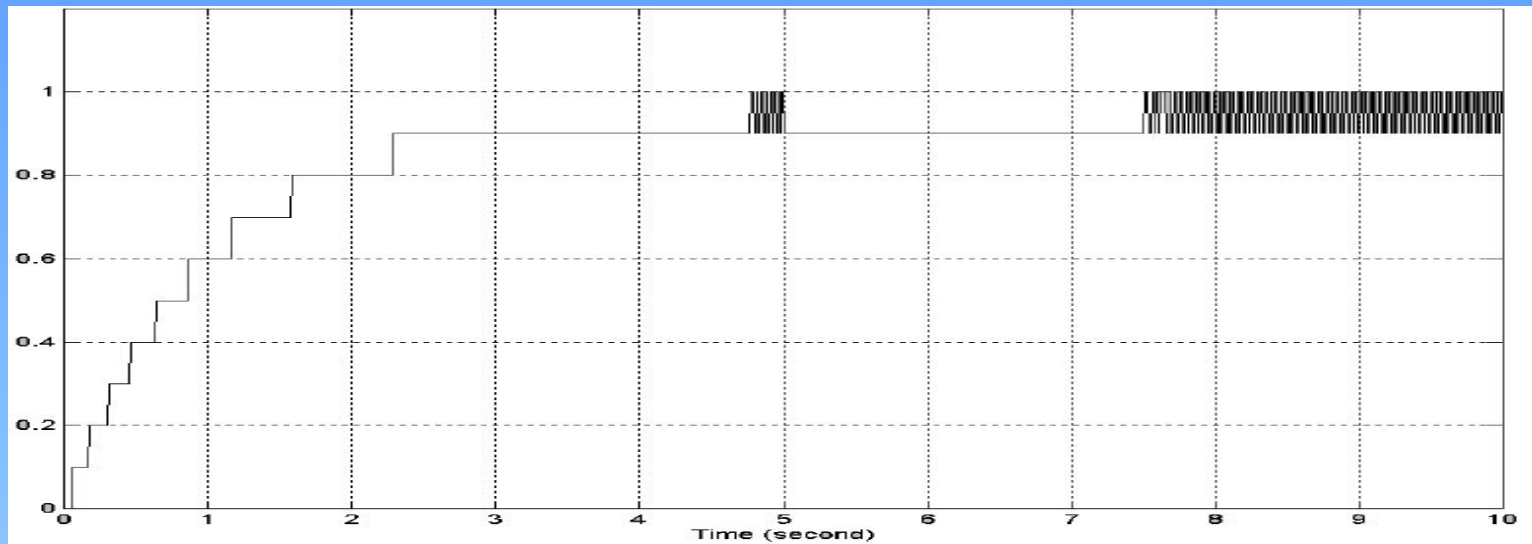


Рис. 3. График переходного процесса тока без блока с зоной нечувствительности

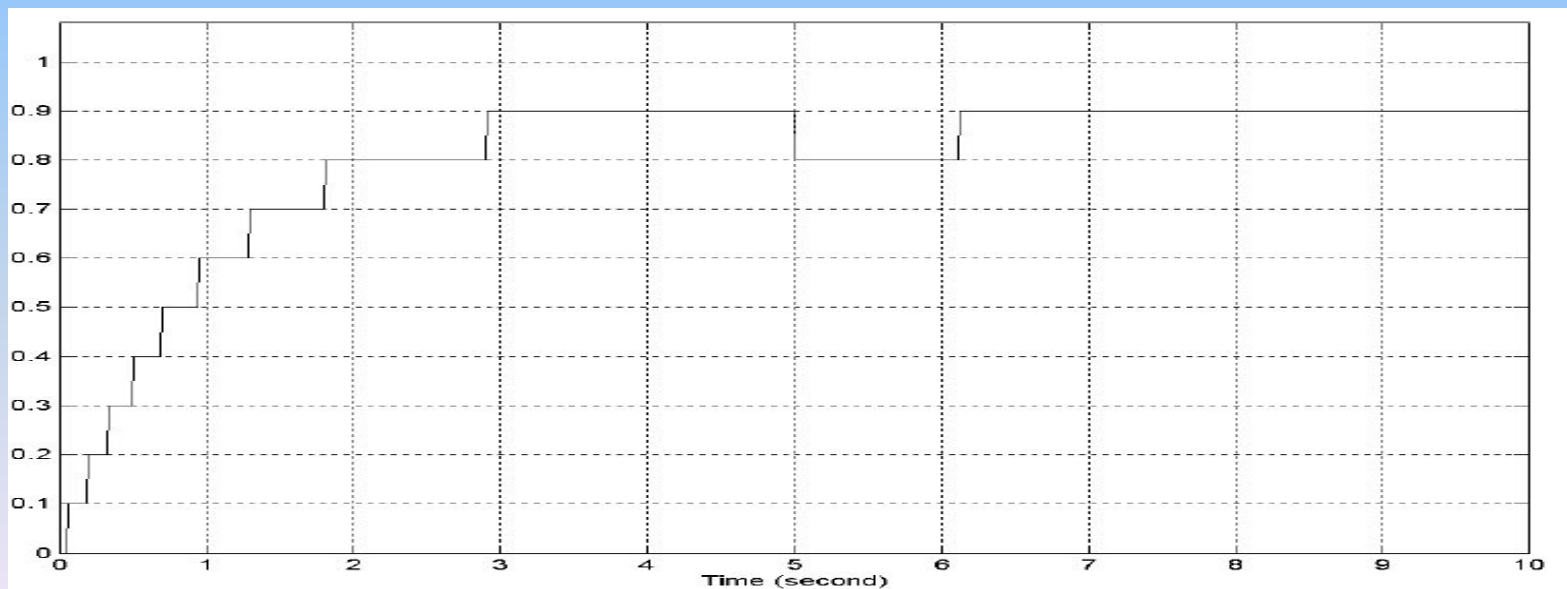
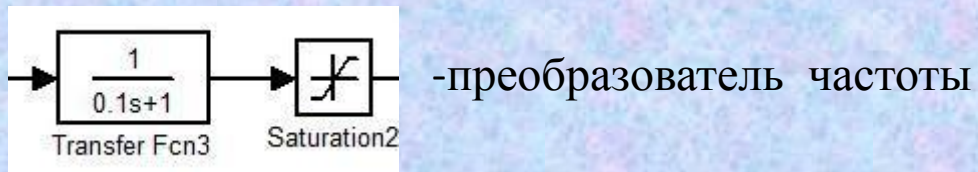


Рис. 4. График переходного процесса тока с блоком с зоной нечувствительности

# 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

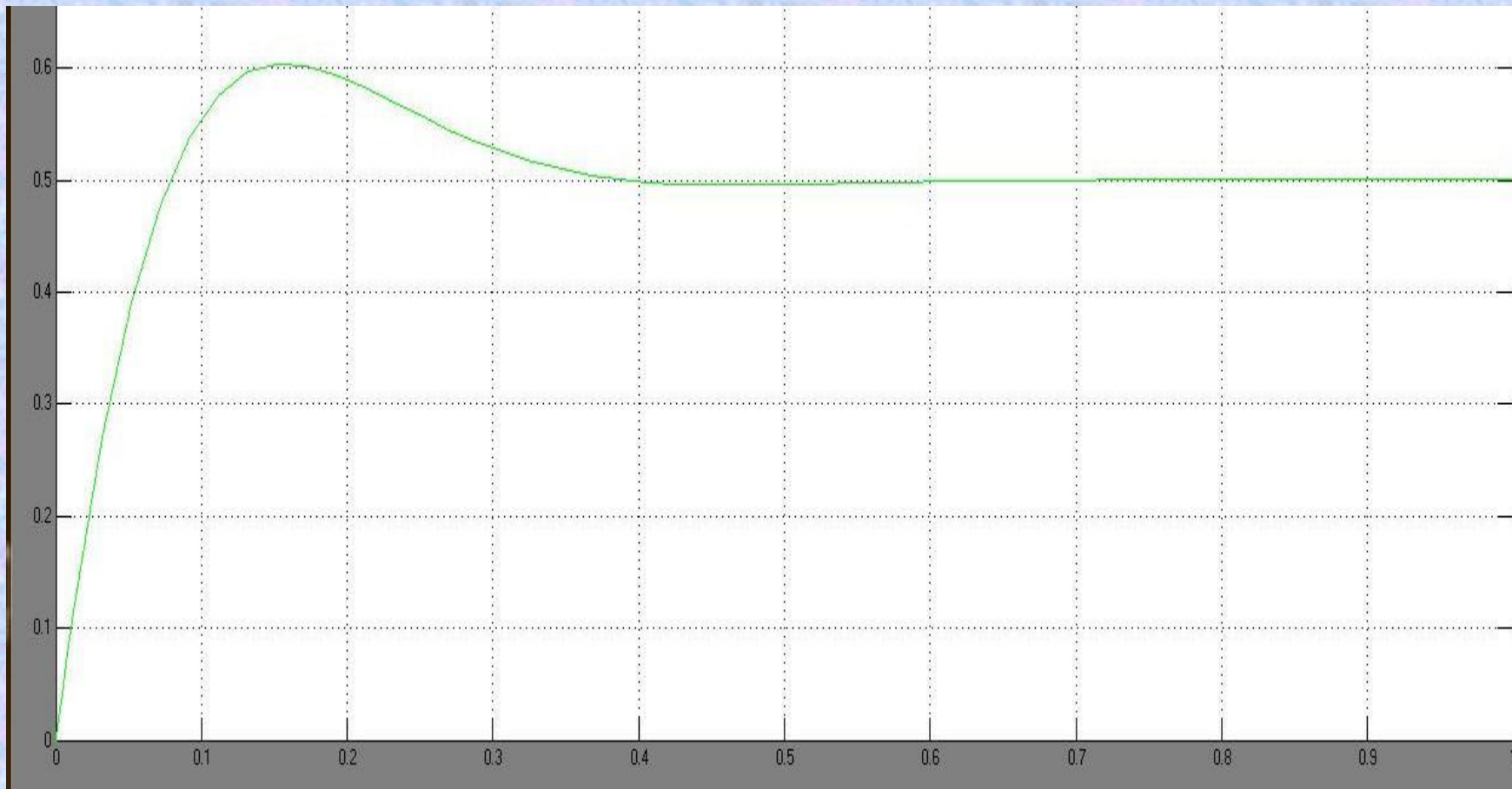


Рис 5. Переходной процесс тока при ПЧ в качестве источника питания.

# Влияние зоны нечувствительности(ЗН) на точность САУ

Табл.2. Зависимость статической ошибки от величины ЗН.

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

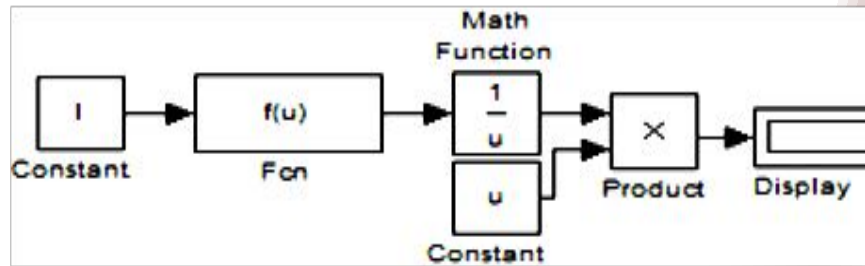


Рис. 8. Структурная модель ИТП (ИТМ) в среде *Simulink*



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

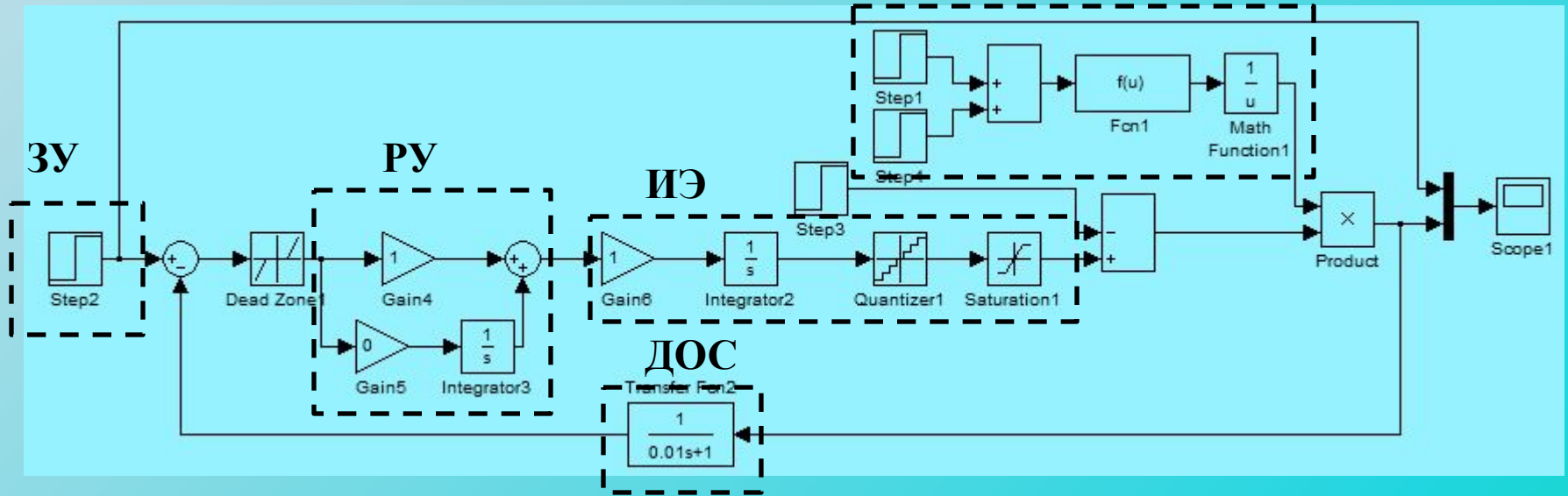


Рис. 9. Блок-схема модели регулятора тока ИТП (или ИТМ) в среде *Simulink* с учетом переменного уровня расплава в тигле

- 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.

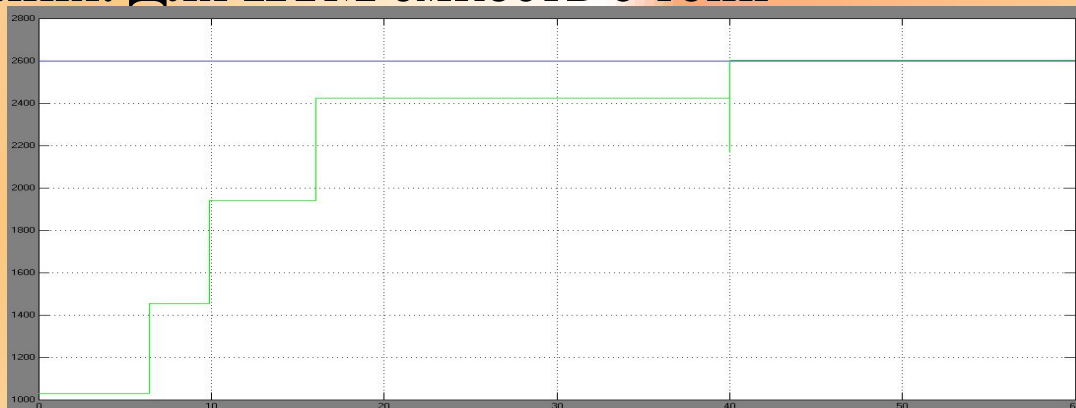
Тип электропечного трансформатора, исходя из потребляемой мощности ИТМ		ЭОМП-1000/10
Мощность, кВ·А		400
Напряжение	первичное, кВ	6 или 10
	вторичное, В	510-85

## Исходные данные для моделирования

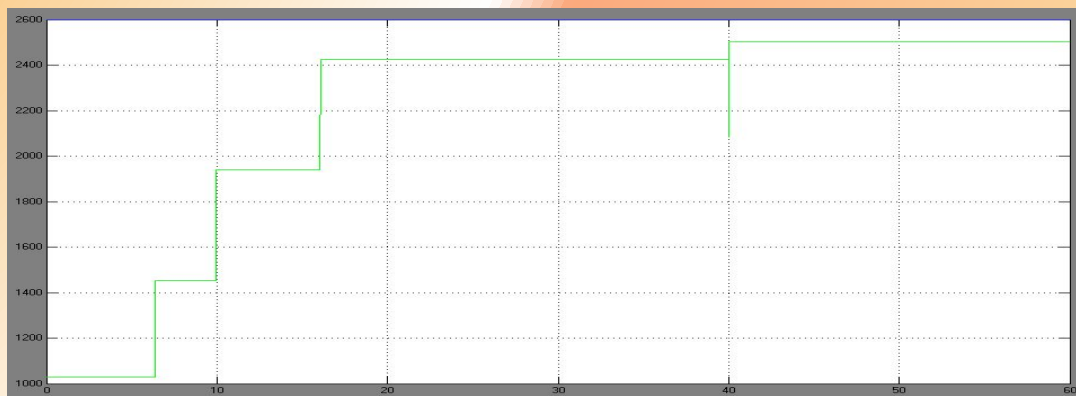
ЗУ Густавка	РУ	ИЭ				ДОС	
		Кр	Δq	U <sub>max</sub>	U <sub>min</sub>	К <sub>дт</sub>	Т <sub>дт</sub>
2600	0,0010	10	40	510	85	1	0,01

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

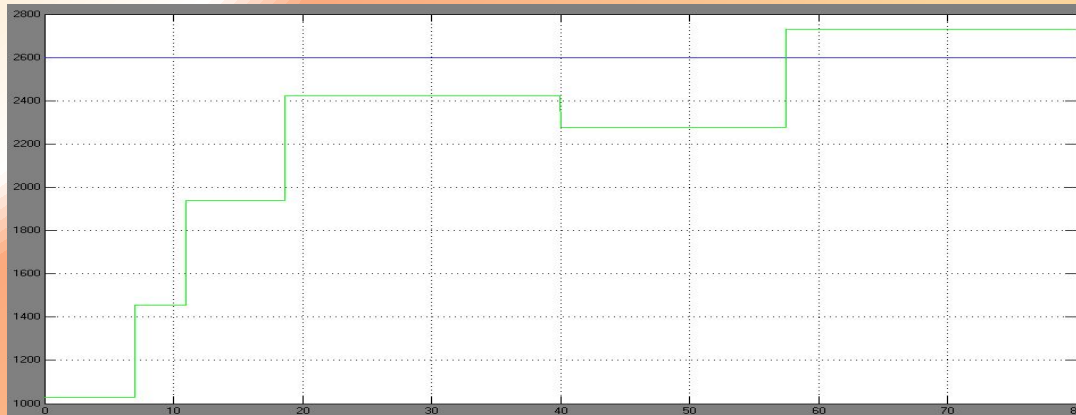
Уровень расплава в тигле  
изменяется от 100% до 75%



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!**