

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**

**высшего профессионального образования**

**К Г Э У**

**«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

**(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)**

---

---

**Кафедра № ЭСиС**

Только для преподавателей

Экз. № \_\_\_\_\_

**УЧЕБНО - МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА**

**по учебной дисциплине**

**Б.1.В.ДВ.13. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Практическое занятие:**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.  
ПОСТРОЕНИЕ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТРАНСФОРМАТОРА.**

**УТВЕРЖДАЮ**

**Заведующий кафедрой ЭСиС**

**Максимов В.В.**

« » \_\_\_\_\_ 201\_ г.

**УЧЕБНО - МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА**

**по учебной дисциплине «Физико-математическое моделирование  
электроэнергетических систем»**

**Практическое занятие:**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.  
ПОСТРОЕНИЕ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТРАНСФОРМАТОРА.**

**Учебные и воспитательные цели:**

1. Дать систематизированные знания о физико-математическом моделировании электроэнергетических систем.
2. Освоить приёмы основных вероятностных расчётов в электроэнергетических задачах

**Вид занятия:** Практическое занятие.

**Продолжительность занятия:** 2 часа.

**Структура занятия и расчет времени.**

<b>№п/п</b>	<b>Структура занятия</b>	<b>Время, мин</b>
<b>1</b>	<b>Вводная часть</b>	<b>10-15</b>
<b>2</b>	<b>Основная часть 1. Решение задач.</b>	<b>70-75</b>
<b>3</b>	<b>Заключительная часть</b>	<b>3-5</b>

**Вводная часть занятия:** проверить наличие и готовность обучающихся к занятию; провести опрос по пройденному материалу в соответствии с перечнем вопросов и подвести его итоги; объявить тему и

учебные цели занятия; обратить внимание обучающихся на важность изучения учебных вопросов занятия, так как знание их может быть востребовано при выполнении курсовой работы и выпускной квалификационной работы.

**Основная часть занятия:** учебные вопросы занятия изучаются в составе группы с применением диафильма, диапроектора, стендов, плакатов, классной доски, цветных мелков. Изучать материал занятия следует в строгом соответствии с учебной программой и тематическим планом изучения учебной дисциплины.

Наименование учебных вопросов преподаватель объявляет последовательно по мере изложения учебного материала и записывает их на классной доске.

На классной доске следует также записывать номер и название темы и занятия, учебные вопросы, цифровые характеристики, формулы, непонятные и сложные для обучаемых термины, чертить поясняющие схемы. Записи на классной доске вести последовательно и аккуратно.

В ходе изложения учебного материала необходимо контролировать степень усвоения учебного материала путем постановки контрольных и проблемных вопросов.

При изучении учебного материала обучающихся должны вести конспект. Контроль за качеством ведения конспектов преподаватель осуществляет в ходе проведения занятия.

**Основная часть занятия:**

**Пример 1.** Определим функцию как решение системы уравнений.

Для удобства записи введем еще две переменные  $I'_2 = I_2 \cos \varphi$  и  $I''_2 = I_2 \sin \varphi$ .

Начальные приближения:

$$U_2 := \frac{U_1}{n} \quad U'_1 := U_1 \quad U''_1 := 0 \quad I_2 := 0 \quad I'_2 := 0$$

Решающий блок Mathcad:

<p>Given</p> $U_2 = \frac{U'_1}{A} - \sqrt{3} \cdot \frac{(\operatorname{Re}(B) \cdot I'_2 + \operatorname{Im}(B) \cdot I''_2)}{A}$ $0 = U''_1 - \sqrt{3} \cdot (\operatorname{Im}(B) \cdot I'_2 - \operatorname{Re}(B) \cdot I''_2)$ $U_1^2 = U'_1{}^2 + U''_1{}^2$ $I'_2 = I \cdot \cos\varphi$ $I''_2 = I \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$
--

Функция как решение системы уравнений:

$F(I, \cos\varphi) := \operatorname{Find}(U_2, U'_1, U''_1, I'_2, I''_2)$
---

Здесь функция  $F$  является вектор-функцией, т. е. содержит пять элементов (по числу неизвестных). Первый элемент дает функцию  $U_2$ , второй –  $U'_1$  и т. д. Нас интересует только первый элемент: функция  $U_2$  от  $I_2$  и  $\cos\varphi$ . Если переменная ORIGIN в Mathcad имеет заданное по умолчанию значение 0, то наша функция будет использоваться в виде  $F(I_2, \cos\varphi)_0$ . Так, например, для  $\cos\varphi = 0,8$  выходная характеристика будет строиться по функции  $F(I_2, 0.8)_0$  при изменении тока от 0 до  $I_{\text{ном}}$ .

**Пример 2.** Построим внешнюю характеристику силового трансформатора ТРДЦН-63000/110 по его математической модели – Г-образной схеме замещения.

Расчеты и построение характеристики выполним в Mathcad. Напряжения в киловольтах, мощности в киловольт-амперах, токи в килоамперах, сопротивления в омах, проводимости в сименсах.

Параметры трансформатора:

$U_{\text{Inom}} := 115$	$U_{2\text{ном}} := 10.5$	$S_{\text{ном}} := 63000$	$P_x := 59.0$	$Q_x := 410$
$R := 0.8$	$X := 22$			

Номинальный ток, коэффициент трансформации и параметры ветви намагничивания:

$$I_{2nom} := \frac{S_{nom}}{\sqrt{3} \cdot U_{2nom}} \cdot 10^{-3} \quad n := \frac{U_{1nom}}{U_{2nom}} \quad G_{\mu} := \frac{P_x}{U_{1nom}^2} \cdot 10^{-3} \quad B_{\mu} := \frac{Q_x}{U_{1nom}^2} \cdot 10^{-3}$$

$$I_{2nom} = 3.464 \quad n = 10.952 \quad G_{\mu} = 4.461 \times 10^{-6} \quad B_{\mu} = 3.1 \times 10^{-5}$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  четырехполюсника:

$$A := n \quad B := \frac{R + j \cdot X}{n} \quad B = 0.073 + 2.009i$$

Условия построения характеристики:

$$U_1 := U_{1nom} \quad I := 0, 0.1 \cdot I_{2nom}, I_{2nom}$$

Начальные приближения:

$$U_2 := \frac{U_1}{n} \quad U'_1 := U_1 \quad U''_1 := 0 \quad I'_2 := 0 \quad I''_2 := 0$$

Решающий блок Mathcad:

$$\text{Given}$$

$$U_2 = \frac{U_1}{A} - \sqrt{3} \cdot \frac{(\text{Re}(B) \cdot I'_2 + \text{Im}(B) \cdot I''_2)}{A}$$

$$0 = U''_1 - \sqrt{3} \cdot (\text{Im}(B) \cdot I'_2 - \text{Re}(B) \cdot I''_2)$$

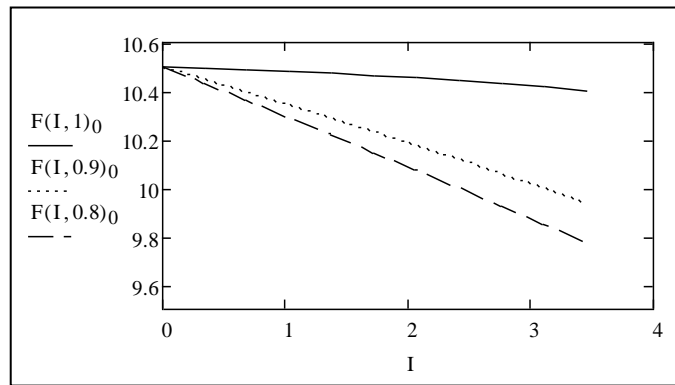
$$U_1^2 = U'_1{}^2 + U''_1{}^2$$

$$I'_2 = I \cdot \text{cosf}$$

$$I''_2 = I \cdot \sqrt{1 - \text{cosf}^2}$$

$$F(I, \text{cosf}) := \text{Find}(U_2, U'_1, U''_1, I'_2, I''_2)$$

Внешние характеристики для трех значений коэффициента мощности: 1; 0,9 и 0,8:



Снижение напряжения на вторичной обмотке с ростом тока нагрузки вызвано потерей напряжения в сопротивлениях обмоток трансформатора. Для того чтобы не допустить снижения напряжения у потребителей электроэнергии, в силовых трансформаторах предусмотрено специальное устройство – регулятор напряжения, который при росте тока нагрузки изменяет коэффициент трансформации таким образом, чтобы обеспечить необходимое напряжение на шинах вторичного напряжения трансформатора.

Получим внешнюю характеристику трансформатора по его упрощенной модели, в которой не учитываются активные параметры:  $R_T = 0$  и  $G_\mu = 0$ , и сопоставим полученные характеристики с характеристиками, полученными по полной модели.

Коэффициенты  $\underline{A}$  и  $\underline{B}$  четырехполюсника для упрощенной модели:

$$A := n \quad B := \frac{j \cdot X}{n} \quad B = 2.009i$$

Начальные приближения:

$$U_2 := \frac{U_1}{n} \quad U'_1 := U_1 \quad U''_1 := 0 \quad I_2 := 0 \quad I'_2 := 0$$

Решающий блок Mathcad:

$$U_2 = \frac{U'_1}{A} - \sqrt{3} \cdot \frac{(\operatorname{Re}(B) \cdot \Gamma_2 + \operatorname{Im}(B) \cdot \Gamma'_2)}{A}$$

$$0 = U''_1 - \sqrt{3} \cdot (\operatorname{Im}(B) \cdot \Gamma_2 - \operatorname{Re}(B) \cdot \Gamma'_2)$$

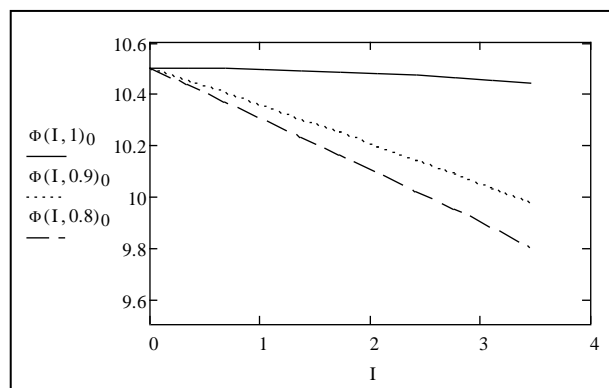
$$U_1^2 = U'^2_1 + U''^2_1$$

$$\Gamma_2 = I \cdot \cos f$$

$$\Gamma'_2 = I \cdot \sqrt{1 - \cos^2 f}$$

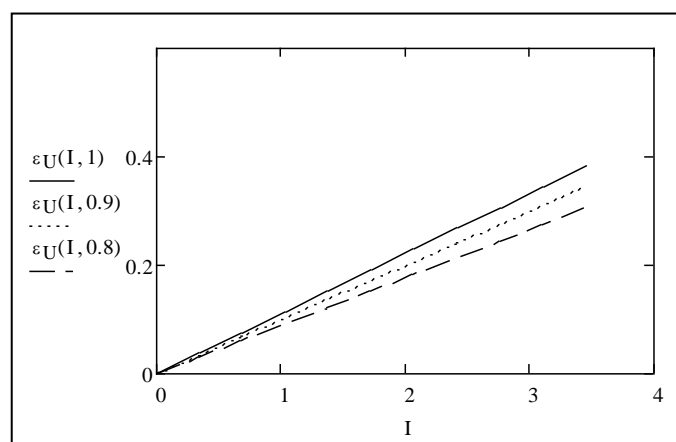
$$\Phi(I, \cos f) := \operatorname{Find}(U_2, U'_1, U''_1, \Gamma_2, \Gamma'_2)$$

Внешние характеристики для трех значений коэффициента мощности: 1; 0,9 и 0,8:



Вычислим и построим функции погрешностей внешних характеристик упрощенной модели:

$$\varepsilon_U(I, \cos f) := \frac{|F(I, \cos f)_0 - \Phi(I, \cos f)_0|}{|F(I, \cos f)_0|} \cdot 100$$



Из последнего рисунка видно, что погрешности характеристик упрощенной модели не превышают 0,4 %. Такая погрешность вполне допустима во многих задачах расчета установившихся режимов и токов

короткого замыкания в электрических системах и поэтому иногда активным сопротивлением обмоток трансформатора и потерями в стали пренебрегают. Следует, однако, заметить, что для трансформаторов малой мощности такая картина не сохраняется и применение упрощенной модели становится более ограниченным.

**Заключительная часть занятия:** Ответить на вопросы, обратить их внимание на необходимость знания изученного материала.

Проверить качество усвоения учебного материала занятия.

Подвести итог занятия, оценить знания и действия.

Выдать задание на самостоятельную работу.

Объявить тему и место проведения очередного занятия, дать команду о наведении порядка в классе и об окончании занятия.

**Доцент кафедры к.т.н. доцент:**

Максимов В.В

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 г.

Обсуждено на заседании кафедры « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 г.,  
протокол № \_\_\_\_