

*МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«Курганский государственный университет»

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
В Понижающем силовом трансформаторе от его  
РЕЖИМА РАБОТЫ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы № 4  
по курсу «Электроэнергетические системы и сети»  
для студентов направления 13.03.03 «Электроэнергетика и электротехника»  
(уровень бакалавриата)

Курган 2015

Кафедра: «Энергетика и технология металлов»

Дисциплина: «Электроэнергетические системы и сети»  
(направления 13.03.03)

Составили: ст. преподаватель К. Н. Наумов, ассистент Д. В. Семакин, доцент,  
канд. техн. наук В. И. Мошкин.

Утверждены на заседании кафедры «27» августа 2014 г.

Рекомендованы методическим советом университета «20» декабря 2013 г.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ПОНИЖАЮЩЕМ СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ ОТ ЕГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Цель работы: исследование зависимости потерь активной мощности в двухобмоточном силовом трансформаторе от величины загрузки трансформатора по активной и реактивной мощности, а также от уровня напряжения на стороне высшего напряжения трансформатора с использованием программного комплекса RastrWin.

#### 1 Основные понятия

Двухобмоточный трансформатор можно представить Г-образной схемой замещения (рисунок 1 а). Продольная часть схемы замещения содержит активное ( $R_T$ ) и реактивное ( $X_T$ ) сопротивления трансформатора. Эти сопротивления равны сумме соответственно активных и реактивных сопротивлений первичной и приведенной к ней вторичной обмоток. В такой схеме замещения отсутствует трансформация, т.е. отсутствует идеальный трансформатор, но сопротивление вторичной обмотки приводится к первичной. При этом приведении сопротивление вторичной обмотки умножается на квадрат коэффициента трансформации. Если сети, связанные трансформатором, рассматриваются совместно, причем параметры сетей не приводятся к одному базисному напряжению, то в схеме замещения трансформатора учитывается идеальный трансформатор.

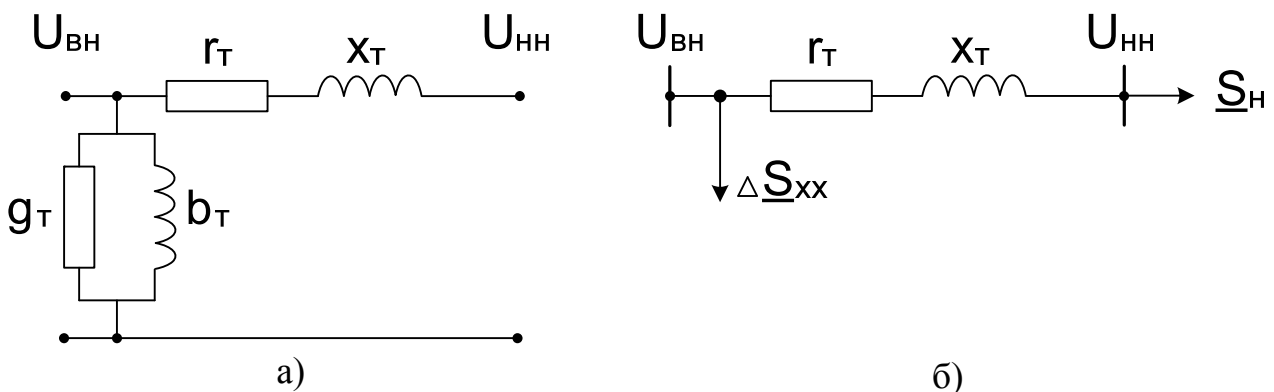


Рисунок 1 – Схемы замещения двухобмоточного трансформатора

Поперечная составляющая схемы замещения (ветвь намагничивания) состоит из активной ( $g_T$ ) и реактивной ( $b_T$ ) проводимости. Активная проводимость соответствует потерям активной мощности в стали трансформатора от тока намагничивания, реактивная проводимость определяется магнитным потоком взаимной индукции в обмотках трансформатора.

В расчетах электрических сетей двухобмоточные трансформаторы номинальным напряжением до 220 кВ включительно зачастую представляют упрощенной схемой замещения (рисунок 1 б). В этой схеме вместо ветви намагничи-

вания учитываются в виде дополнительной нагрузки потери мощности в стали трансформатора или потери холостого хода  $\Delta P_X + j\Delta Q_X$ .

Для каждого двухобмоточного трансформатора известны следующие паспортные параметры (каталожные данные):

$S_{НОМ}$  – номинальная мощность, МВ·А;

$U_{В.НОМ}$ ,  $U_{Н.НОМ}$  – номинальные напряжения обмоток высшего и низшего напряжений, кВ;

$\Delta P_X$  – активные потери холостого хода, кВт;

$i_{X\%}$  – ток холостого хода, % от  $I_{НОМ}$ ;

$\Delta P_{КЗ}$  – потери короткого замыкания, кВт;

$u_{K\%}$  – напряжение короткого замыкания, % от  $U_{НОМ}$ .

По этим данным можно определить все параметры схемы замещения трансформатора (сопротивления и проводимости (формулы (1)-(5)), а также потери мощности в нем.

Проводимости ветви намагничивания определяются по результатам опыта холостого хода (х.х.). В этом опыте размыкается вторичная обмотка, а к первичной подводится номинальное напряжение. Ток в продольной части схемы замещения равен нулю, а к поперечной приложено номинальное напряжение. Трансформатор потребляет в этом режиме только мощность, равную потерям холостого хода, т. е.

$$\Delta S_X = \Delta P_X + j\Delta Q_X . \quad (1)$$

Потери реактивной мощности холостого хода в трансформаторе, кВАр:

$$\Delta Q_X = \frac{i_{X\%} \cdot S_{НОМ}}{100} \quad (2)$$

Активная проводимость трансформатора, См:

$$g_T = \frac{\Delta P_X}{U_{НОМ}^2} \quad (3)$$

Реактивная проводимость трансформатора

$$b_T = \frac{\Delta Q_X}{U_{НОМ}^2} \quad (4)$$

Сопротивления трансформатора  $r_T$  и  $x_T$  определяются по результатам опыта короткого замыкания (к.з.). В этом опыте замыкается накоротко вторичная обмотка, а к первичной обмотке подводится такое напряжение, при котором в обеих обмотках трансформатора токи равны номинальному. Это напряжение и называется напряжением короткого замыкания  $u_K$  %.

Потери в стали в опыте короткого замыкания  $\Delta P_{СТ}$  очень малы, так как  $u_K$  % намного меньше  $U_{НОМ}$ . Поэтому приближенно считают, что все потери мощности  $\Delta P_{КЗ}$  в опыте к.з. идут на нагрев обмоток трансформатора.

Активное сопротивление двухобмоточного трансформатора, Ом:

$$r_T = \frac{\Delta P_{КЗ}}{S_{НОМ}^2} \quad (5)$$

Реактивное сопротивление двухобмоточного трансформатора, Ом:

$$X_T = \frac{u_{к\%} \cdot U_{НОМ}^2}{100\% \cdot S_{НОМ}} \quad (6)$$

Для трансформатора, через обмотки которого проходят ток нагрузки  $I_H$  и мощность нагрузки  $S_H$ , нагрузочные потери активной мощности, кВт:

$$\Delta P_H = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_{НОМ}^2} \cdot r_m = 3 \cdot I_H^2 \cdot r_m \quad (7)$$

Нагрузочные потери реактивной мощности, кВАр:

$$\Delta Q_H = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_{НОМ}^2} \cdot x_m = 3 \cdot I_H^2 \cdot x_m \quad (8)$$

Подставив (5) в (7) и (6) в (8), получим суммарные потери активной и реактивной мощности в трансформаторе:

$$\Delta P_m = \Delta P_x + \Delta P_H = \Delta P_x + \frac{\Delta P_{кз} \cdot S_H^2}{S_{НОМ}^2} \quad (9)$$

$$\Delta Q_m = \Delta Q_x + \Delta Q_H = \frac{I_{x\%} \cdot S_{НОМ}}{100\%} + \frac{\Delta u_k \cdot S_H^2}{100\% \cdot S_{НОМ}} \quad (10)$$

Если на подстанции с суммарной нагрузкой  $S_H$  работают параллельно  $k$  одинаковых трансформаторов, то их эквивалентные сопротивления в  $k$  раз меньше, а проводимости в  $k$  раз больше. Если учесть это в выражениях (9) и (10), то получим следующие выражения для суммарных потерь мощности:

$$\Delta P_m = k \cdot \Delta P_x + \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta P_{кз} \cdot S_H^2}{S_{НОМ}^2} \quad (11)$$

$$\Delta Q_m = k \cdot \frac{I_{x\%} \cdot S_{НОМ}}{100\%} + \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta u_k \cdot S_H^2}{100\% \cdot S_{НОМ}} \quad (12)$$

Итак, как это показано в выражениях (9) и (11), общие (суммарные) потери активной мощности в трансформаторе складываются из нагрузочных потерь, обусловленных протеканием электрического тока по обмоткам трансформатора, и потерь холостого хода (потерь в стали трансформатора), не зависящих от величины нагрузки. При больших нагрузках потери мощности в обмотках намного больше потерь в стали трансформатора, а при малых нагрузках возможно обратное.

Изменяя значение нагрузки, построим зависимость общих потерь активной мощности в трансформаторе от величины нагрузки –  $\Delta P_T = f(S)$  – для разного числа трансформаторов (рисунок 2).

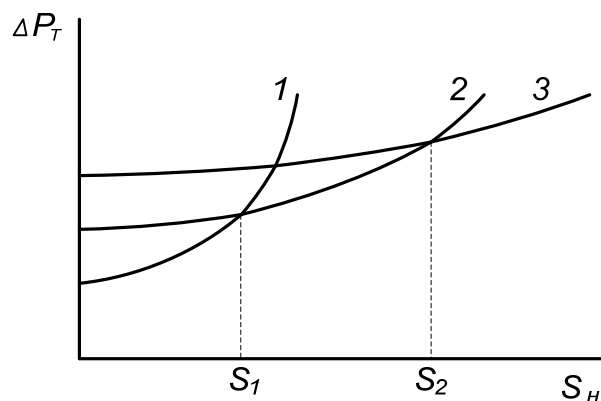


Рисунок 2 – Потери мощности в трансформаторах

Из графика видно, что при изменении нагрузки от нуля до  $S_1$  экономически целесообразна работа одного трансформатора, при нагрузке от  $S_1$  до  $S_2$  целесообразна работа двух трансформаторов, при нагрузке свыше  $S_3$  целесообразно включить третий трансформатор.

Нагрузка трансформаторов, при которой суммарные потери активной мощности при  $k - 1$  и  $k$  параллельно работающих трансформаторах равны, может быть определена из выражения

$$S_{\text{Э}} = S_{\text{НОМ}} \sqrt{k \cdot (k - 1) \frac{\Delta P_{\text{X}}}{\Delta P_{\text{КЗ}}}}. \quad (13)$$

## 2 Описание лабораторной установки

Выполнение лабораторной работы производится на персональной ЭВМ с использованием специализированной программы для расчета установившихся электрических режимов работы электрической сети – RastrWin.

## 3 Порядок выполнения работы

3.1 На основании данных **Задания** к лабораторной работе (Приложение А) и в соответствии с вариантом составляется схема замещения электрической сети.

Все узлы схемы замещения нумеруются цифрами от 1 до 100.

Выполняется расчет параметров элементов сети.

Расчетные параметры наносятся на схему замещения, на которой уже указаны номера узлов.

В соответствии со схемой замещения производится подготовка данных для расчета режима работы электрической сети в программе RastrWin:

- заполняется таблица узлов;
- заполняется таблица ветвей;
- на основании полученной расчетной схемы формируется графическое отображение электрической сети;
- производится расчет установившегося режима работы электрической сети;
- результаты расчета заносятся в таблицу.

3.2 Расчеты произвести для различных функциональных зависимостей:

- зависимость суммарных потерь активной мощности в трансформаторах (в обмотках и на холостой ход) от величины загрузки трансформаторов по активной мощности  $\Delta P_T = f(P_H)$ ;
- зависимость суммарных потерь активной мощности в трансформаторах (в обмотках и на холостой ход) от величины загрузки трансформаторов по реактивной мощности  $\Delta P_T = f(Q_H)$ ;
- зависимость суммарных потерь активной мощности в трансформаторах (в обмотках и на холостой ход) от уровня напряжения на стороне ВН трансформатора  $\Delta P_T = f(U_{ВН})$ .

Зависимость  $\Delta P_T = f(U_{ВН})$  необходимо определить для двух случаев: без учета активной проводимости трансформаторов на землю, и с учетом активной проводимости.

3.3 Все расчеты пункта 1 повторить для условия параллельной работы двух и трех однотипных трансформаторов.

#### **4 Содержание и оформление отчета**

Отчет должен содержать следующие данные:

- схема замещения трансформатора;
- паспортные и расчетные параметры схемы замещения трансформатора;
- все проделанные расчеты;
- таблицы с расчетными данными;
- графики полученных зависимостей;
- анализ полученных результатов и выводы.

Отчет оформляется на листах формата А4. На титульном листе указывается фамилия студента, курс, группа, специальность, а также название работы.

## Контрольные вопросы

- 1 Назовите условия параллельной работы силовых трансформаторов.
- 2 Каковы допустимые отклонения в коэффициентах трансформации силовых трансформаторов при их параллельной работе?
- 3 Каковы допустимые отклонения в напряжениях к.з. для силовых трансформаторов при их параллельной работе?
- 4 От каких параметров режима зависят потери в трансформаторе?
- 5 Как определяют оптимальный коэффициент нагрузки силового трансформатора?
- 6 При каких условиях потери мощности в обмотках силовых трансформаторах будут меньше потерь в стали трансформатора?
- 7 Что такое время максимальных потерь?
- 8 Как можно объяснить снижение общих потерь в трансформаторах на подстанции при отключении одного из них?
- 9 По какому критерию выбираются мощности трансформаторов понижающих подстанций?
- 10 В чем различие трансформаторов с РПН и без РПН?



## Список литературы

- 1 Идельчик В. И. Электрические системы и сети. М : Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
- 2 Пospelов Г. Е., Федин В. Т. и др. Электрические системы и сети. Минск : УП Технопринт, 2004. 720 с.
- 3 Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии. Ростов н/Д. : Феникс, 2006. 720 с.
- 4 Лыкин А. В. Электрические системы и сети : учеб. пособие. М. : Логос, 2006. 254 с.
- 5 Макаров Е. Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4-1150 кВ. М. : Энергия, 2006.
- 6 Веников В. А. Электрические системы. Электрические сети. М. : Высшая школа, 1998. 511 с.

## Приложение А

### Задание для лабораторной работы № 4

Таблица А1 – Параметры оборудования электрической сети

Вариант	Марка трансформатора	$U_{\text{ном.в}}/U_{\text{ном.н}},$ кВ	$u_{\text{к}},$ %	$\Delta P_{\text{кз}},$ кВт	$\Delta P_{\text{х}},$ кВт	$I_0,$ %
1	ТДН-16000/110	115/11	10,5	85	19	0,7
2	ТРДН-25000/110	115/10,5/10,5	10,5	120	27	0,7
3	ТД-40000/110	121/10,5	10,5	160	50	0,65
4	ТРДН-40000/110	115/6,3/6,3	10,5	172	36	0,65
5	ТРДН-40000/110	115/10,5/10,5	10,5	172	36	0,65
6	ТРДЦН-63000/110	115/10,5/10,5	10,5	260	59	0,6

Наумов Константин Николаевич

Семакин Даниил Владимирович

Мошкин Владимир Иванович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
В ПОНИЖАЮЩЕМ СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ ОТ ЕГО  
РЕЖИМА РАБОТЫ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы № 4  
по курсу «Электроэнергетические системы и сети»  
для студентов направления 13.03.03 «Электроэнергетика и электротехника»  
(уровень бакалавриата)

Редактор Е.А. Могутова

---

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл.печ.л. 0,75	Уч.-изд. л. 0,75
Заказ	Тираж 25	Не для продажи

---

РИЦ Курганского государственного университета.  
640000, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.