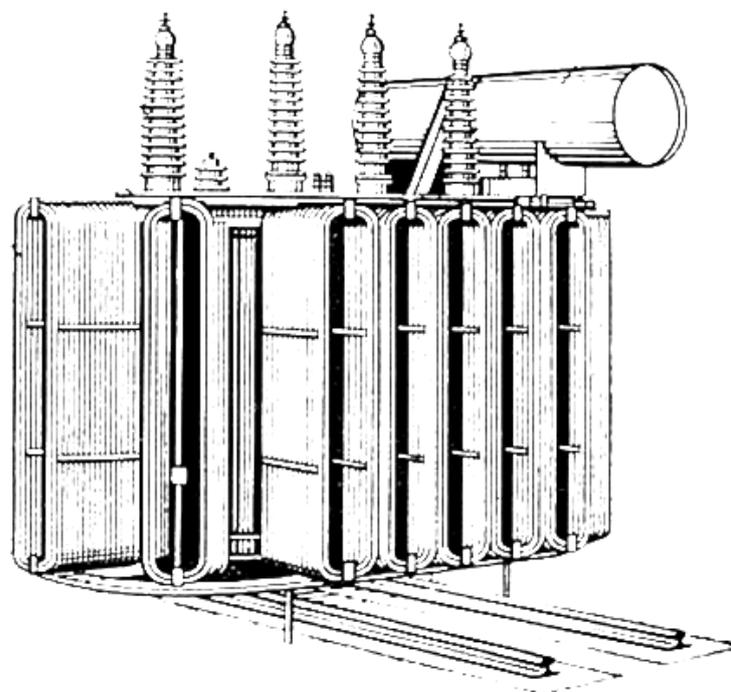


МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ  
ФГОУ ВПО «БРЯНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Безик В.А.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Методические указания по изучению дисциплины  
и задание для контрольной работы  
для студентов заочной и очной форм обучения специальности  
110302 – Электрификация и автоматизация сельского хозяйства



БРЯНСК 2010

УДК 631.371 : 621.311 (076)  
ББК 40.76  
Б 39

**Безик В.А.** Электрические машины: методические указания по изучению дисциплины и задание для контрольной работы / В.А. Безик – Брянск. Издательство БГСХА, 2010. – 24 с.

Методические указания содержат краткое содержание курса «Электрические машины», задание для контрольной работы и методические указания по их выполнению. Оно позволяет студентам заочной и очной форм обучения специальности «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», пользуясь предлагаемой литературой, изучить курс «Электрические машины», самостоятельно выполнить контрольные работы. Методические указания значительно облегчают решение контрольной работы.

Рекомендовано к изданию решением методической комиссии факультета энергетики и природопользования от 18 января 2010 года, протокол № 26.

Рецензенты:

зав. кафедрой высшей математики и физики, действительный член академии АПК, д.т.н., профессор Погоньшев В.А. (Брянская ГСХА),

кандидат технических наук, доцент Башлыков В. А. (Брянский ГТУ)

© Брянская ГСХА, 2010  
© Безик В.А., 2010

## **Общие методические рекомендации по изучению дисциплины**

Развитие сельскохозяйственного производства в нашей стране осуществляется на базе широкой комплексной механизации и автоматизации производственных процессов во всех сферах человеческой деятельности. При этом электрические машины используются не только в качестве источников энергии, но и как измерительные, управляющие и исполнительные элементы в системах автоматизации и контроля. В настоящее время более половины всей вырабатываемой электроэнергии потребляется электрическими машинами, поэтому дальнейшее развитие электроэнергетики зависит от качества использования электрических машин.

Курс электрических машин как учебная дисциплина основывается на знаниях физики, теоретических основ электротехники, теплотехнике, играет важную роль в формировании специалистов в области электрификации и автоматизации сельского хозяйства.

В результате изучения дисциплины студент должен знать устройство, принципы действия, характеристики, режимы работы и области применения электрических машин, уметь подключать, испытывать, рассчитывать и измерять параметры, строить необходимые характеристики электрических машин, выбирать пусковую, и регулировочную аппаратуру. Он должен быть подготовлен к решению задач, связанных с выбором, монтажом и рациональной эксплуатацией электрических машин в сельском хозяйстве.

В процессе изучения дисциплины студент посещает лекционные и лабораторно-практические занятия, выполняет лабораторные работы, составляет и сдает по ним отчеты. Он должен самостоятельно проработать программный материал по рекомендованным учебным пособиям, выполнить контрольную работу, сдать ее в срок и получить зачет.

Задания для контрольной работы разбиты на 50 вариантов, номер варианта назначает преподаватель.

Данное методическое пособие содержит краткий перечень тем для изучения, список рекомендуемой литературы, задания для контрольной работы и методические указания для их выполнения.

# 1. Содержание разделов дисциплины

## 1.1 Введение

Значение электрических машин и трансформаторов для электрификации и автоматизации сельского хозяйства и для электроэнергетики в целом.

Краткая история развития электрических машин и трансформаторов и задачи электромашиностроения на современном этапе.

Материалы, применяемые в электромашиностроении.

Основные типы электрических машин и общие принципы их устройства. Электромеханическое преобразование энергии в электрической машине. Преобразование электрической энергии в трансформаторе. Основные законы электротехники, в соответствии с которыми осуществляется электромеханическое преобразование энергии.

## 1.2 Трансформаторы

*Области применения и конструкции трансформаторов.* Назначение, области применения, принцип действия и номинальные данные трансформаторов. Устройство магнитных систем, обмоток, баков и других элементов конструкции трансформаторов. Особенности устройства трансформаторов малой и большой мощности.

*Процессы в трансформаторе при холостом ходе.* Основное магнитное поле и поле рассеяния. Формулы для ЭДС. Характеристика намагничивания. Магнитные потери. Сопротивление взаимоиндукции.

*Процессы в трансформаторе при нагрузке.* Магнитное поле при нагрузке. Индуктивности рассеяния обмоток. Намагничивающий ток и уравнение равновесия МДС. Уравнения равновесия напряжений обмоток. Приведение вторичных величин к первичной обмотке. Электрическая схема замещения трансформатора и векторная диаграмма. Определение параметров и потерь из опытов холостого хода и короткого замыкания.

*Эксплуатационные характеристики трансформаторов при нагрузке.* Зависимость напряжения и КПД от нагрузки. Регулирование напряжения трансформаторов с отключением от сети и при нагрузке.

*Схемы и группы соединения трансформаторов. Явления, возникающие при намагничивании магнитопроводов трансформаторов.* Схемы и группы соединения обмоток трансформаторов. Формы кривых намагничивающего тока, потока, ЭДС и напряжений. Процессы в трехфазном трансформаторе при симметричной нагрузке.

*Параллельная работа трансформаторов.* Условия включения трансформаторов на параллельную работу. Оценка возможных уравнивающих токов, распределение нагрузки между трансформаторами.

*Автотрансформаторы.* Конструктивные особенности и схемы автотрансформаторов. Преимущества и недостатки автотрансформаторов по сравнению с обычными трансформаторами. Области применения.

*Многообмоточные трансформаторы.* Уравнения равновесия напряжений и МДС. Схема замещения и векторная диаграмма. Изменение вторичных

напряжений. Соотношение между мощностями обмоток. Области применения трансформаторов.

*Несимметричные режимы трансформаторов.* Токи и потоки нулевой последовательности в трансформаторах с различной конструкцией магнитопровода. Схема замещения и сопротивление трансформатора для токов нулевой последовательности. Работа трансформатора с различными схемами соединения обмоток при несимметричной нагрузке.

*Переходные процессы в трансформаторах.* Особенности работы трансформатора при переходном процессе. Включение в сеть трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. Внезапное короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки трансформатора, ударный ток короткого замыкания. Электродинамические силы, возникающие при внезапном коротком замыкании. Витковое короткое замыкание в трансформаторе. Нагревание и охлаждение трансформаторов.

*Трансформаторы специального назначения.* Трансформаторы для преобразования частоты и числа фаз. Трансформаторы с плавным регулированием напряжения. Трансформаторы для дуговой электросварки. Трансформаторы для выпрямительных установок. Реакторы.

### **1.3 Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии**

*Вращающееся магнитное поле.* Создание вращающегося поля трехфазной пространственно распределенной обмоткой. Синхронная частота вращения поля. Результирующее магнитное поле электрической машины. Основное магнитное поле и поле рассеяния.

*Обмотки электрических машин и ЭДС обмоток.* Основные принципы устройства сосредоточенных и пространственно распределенных обмоток. Однослойные и двухслойные трехфазные обмотки. Наведение ЭДС в пространственно распределенной обмотке. Обмоточный коэффициент.

*Магнитодвижущие силы обмоток.* МДС катушки, одной фазы и трех фаз пространственно распределенной обмотки. Изменение МДС обмотки во времени и в пространстве.

*Электромагнитный момент.*

### **1.4 Асинхронные машины**

*Режимы работы, области применения и конструкции асинхронных машин.* Назначение, области применения и принцип действия асинхронных машин. Устройство активной части и конструктивных элементов. Исполнение асинхронных машин по степени защиты. Особенности устройства двигателей единых серий. Асинхронная машина – обобщенный трансформатор. Преобразование вида энергии, величины напряжения, частоты напряжения, фазы напряжения и числа фаз.

*Векторная диаграмма и схемы замещения асинхронной машины.*

*Параметры асинхронной машины.* Уравнения равновесия напряжений и МДС. Векторная диаграмма. Т-образная и Г-образная электрические схемы замещения, параметры схем.

*Опыты холостого хода и короткого замыкания асинхронной машины.* Характеристики холостого хода и короткого замыкания. Опытное определение параметров схемы замещения. Разделение потерь холостого хода.

*Круговая диаграмма и рабочие характеристики асинхронной машины. Энергетическая диаграмма.* Построение круговой диаграммы по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. Определение рабочих характеристик по круговой диаграмме. Распределение активной мощности.

*Электромагнитный момент асинхронной машины.*

*Устойчивость работы асинхронного двигателя.* Механическая характеристика асинхронной машины. Зависимость момента от скольжения. Перегрузочная способность двигателя.

*Пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя.* Пуск двигателей с фазным ротором и с короткозамкнутым типа "беличья клетка". Регулировочные свойства двигателя и способы регулирования частоты вращения.

*Генераторный, тормозной и трансформаторный режимы работы асинхронной машины.* Работа асинхронного генератора в автономной системе. Условия самовозбуждения. Режим противовключения. Индукционный регулятор, фазорегулятор.

*Однофазные двигатели.* Способы создания пускового момента. Однофазный конденсаторный двигатель. Трехфазный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором.

*Асинхронные машины автоматических устройств.* Исполнительные двигатели. Тахогенератор. Поворотные трансформаторы.

*Серии асинхронных двигателей и эксплуатационные требования.* Характеристика единых серий: А и АО, А2 и АО2, 4А, АИ, 5А и др. Обозначение типов двигателей.

## **1.5 Синхронные машины**

*Режимы работы, области применения и конструкции синхронных машин.* Назначение, области применения и принцип действия синхронных машин. Устройство активной части и конструктивных элементов. Системы возбуждения. Особенности устройства явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин.

*Магнитное поле синхронной машины при холостом ходе и нагрузке. Реакция якоря.* Магнитное поле обмотки возбуждения. Результирующее магнитное поле при различном характере нагрузки.

*Параметры синхронных машин в установившемся режиме и характеристики синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку.* Индуктивные сопротивления явнополюсной и неявнополюсной синхронной машины. Характеристика холостого хода, индукционная нагрузочная, внешняя, регулировочная и характеристика короткого замыкания.

*Векторные диаграммы синхронных генераторов.* Векторные диаграммы явнополюсных и неявнополюсных синхронных генераторов.

*Параллельная работа синхронных машин.* Включение на параллельную работу синхронных генераторов с сетью бесконечно большой мощности. Особен-

ности работы генератора с сетью. Параллельная работа синхронных генераторов соизмеримой мощности.

*Характеристики синхронного генератора, работающего параллельно с сетью бесконечно большой мощности.* Угловая характеристика.  $U$ -образные характеристики. Регулирование активной и реактивной мощности.

*Синхронные двигатели и синхронный компенсатор.* Угловая характеристика и  $U$ -образные характеристики двигателя. Рабочие характеристики двигателя. Сопоставление асинхронного и синхронного двигателей. Назначение и  $U$ -образная характеристика компенсатора.

*Переходные процессы в синхронных машинах.*

*Специальные синхронные машины.* Синхронные генераторы для дизель-генераторных установок. Автомобильные и тракторные генераторы. Индукторный генератор. Шаговый, реактивный и гистерезисный двигатели.

*Серии синхронных машин и эксплуатационные требования.* Технические данные турбогенераторов, гидрогенераторов, генераторов общего назначения, синхронных компенсаторов и синхронных двигателей.

## **1.6 Машины постоянного тока**

*Режимы работы, области применения и конструкции машин постоянного тока.* Назначение, области применения и принцип действия машин постоянного тока. Устройство активной части и конструктивных элементов. Коллектор – механический преобразователь частоты.

*Обмотки якорей машин постоянного тока.* Радиальная, развернутая и электрическая схемы обмоток. ЭДС обмотки якоря. Электромагнитный момент.

*Магнитное поле машины постоянного тока при холостом ходе и нагрузке.* Реакция якоря. Магнитное поле обмотки возбуждения. Магнитное поле обмотки якоря. Результирующее поле. Действие реакции якоря при различном положении щеток на коллекторе.

*Коммутация и способы ее улучшения.* Прямолинейная и криволинейная коммутация. Реактивная ЭДС и ЭДС вращения. Способы уменьшения добавочного тока в коммутируемой секции обмотки якоря.

*Характеристики генераторов постоянного тока.* Энергетическая диаграмма. Схемы возбуждения генераторов. Энергетическая диаграмма. Характеристика холостого хода, нагрузочная, внешняя, регулировочная и характеристика короткого замыкания. Параллельная работа генераторов.

*Характеристики двигателей постоянного тока.* Энергетическая диаграмма.

*Механическая характеристика и устойчивость работы.* Энергетическая диаграмма. Рабочие характеристики. Механическая характеристика при различных способах возбуждения и устойчивость работы.

*Пуск и регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.* Прямой пуск, пуск с помощью пускового реостата и при пониженном напряжении. Регулирование частоты вращения изменением напряжения, введением сопротивления в цепь обмотки якоря и изменением потока возбуждения. Сопоставление двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей.

*Специальные машины постоянного тока. Универсальный коллекторный двигатель. Исполнительные двигатели постоянного тока. Магнитогидродинамический генератор. Тахогенератор. Электромашинный усилитель. Униполярный генератор. Вентильные двигатели.*

*Серии машин постоянного тока и эксплуатационные требования. Характеристика серий двигателей постоянного тока общего назначения 2П и 4П и др. Обозначение типов двигателей.*

***1.7 Особенности развития электромашиностроения на современном этапе. Возобновляемые источники энергии.***

## **2. Рекомендуемая литература**

### Основная

- 1) Копылов И. П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 2002. – 607 с.
- 2) Ванурин В. Н. Электрические машины. М.: Колос, 1995. – 432 с.
- 3) Александров Н. Н. Электрические машины и микромашины. М.: Колос, 1983. – 384 с.
- 4) Кацман М.М. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2002. - 469 с.
- 5) Епифанов А. П. Электрические машины. СПб.: Лань, 2006. - 272 с.

### Дополнительная

- 1) Сукманов В.И. Электрические машины и аппараты. М.: Колос, 2001. – 296 с.
- 2) Проектирование электрических машин / Под ред. И. П. Копылова. М.: Энергия, 1980. 496 с.
- 3) Беспалов В. Я. Электрические машины. М.: Академия, 2006. - 320 с.
- 4) Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2007. - 320 с.
- 5) Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001.

### 3. Задание для контрольной работы

Трехфазный двухобмоточный трансформатор включен в сеть с напряжением  $U = U_{1н}$ . Величины, характеризующие номинальный режим работы трансформатора, приведены в таблице 1: полная мощность  $S_H$ ; первичное номинальное фазное напряжение  $U_{1н}$ , вторичное номинальное фазное напряжение  $U_{2н}$ . Кроме того, заданы значения тока холостого хода  $I_{10}$  (в % от номинального), мощность потерь холостого хода  $P_{10}$ . напряжение короткого замыкания  $u_k$  (в % от номинального), мощность потерь короткого замыкания (при номинальном токе)  $P_{кн}$ .

Таблица 1 - Исходные данные для задачи

№ варианта	$S_H$ кВА	$U_{1н}$ , кВ	$U_{2н}$ , кВ	$u_k$ , %	$I_{10}$ , %	$P_{10}$ , Вт	$P_{кн}$ , Вт
1	6	3	4	5	6	7	8
1	24	10	0,4	4,5	3,2	123	690
2	40	10	0,4	4,7	3	180	999
3	63	10	0,4	4,7	2,8	264	1278
4	63	20	0,4	5,4	2,8	288	1278
5	100	10	0,4	4,7	2,6	363	2268
6	100	35	0,4	6,6	2,6	465	2268
7	160	10	0,4	6,6	2,4	540	3099
8	160	35	0,4	6,6	2,4	660	3099
9	250	10	0,4	6,6	2,4	780	4200
10	250	35	0,4	6,6	2,3	960	4200
11	400	10	0,4	4,5	2,1	1080	5499
12	400	35	0,4	6,6	2,1	1350	5499
13	630	10	0,4	5,6	2	1878	7599
14	630	35	0,4	6,6	2	1998	8499
15	63	20	0,4	5,4	4,4	390	1278
16	160	20	0,4	6,6	4	729	2538
17	250	20	0,4	6,6	3,7	1050	3579
18	400	20	0,4	6,4	3,3	1530	5178
19	630	20	0,4	6,4	3,2	2100	7338
20	1000	10	0,4	5,6	1,4	2448	12198
21	1000	35	0,4	6,6	1,5	2748	12198
22	1600	10	0,4	5,6	1,3	3300	18000
23	1600	35	0,4	6,6	1,4	3648	1800
24	2500	10	0,4	6,6	1	4599	23499
25	2500	36	0,4	6,6	1.1	5100	23499
26	24	10	0,4	4	3	120	678
27	40	10	0,4	4,5	3	168	969
28	63	10	0,4	4,5	2,8	249	1149

Продолжение таблицы 1

№ варианта	$S_H$ кВА	$U_{1H}$ , кВ	$U_{2H}$ , кВ	$u_k$ , %	$I_{10}$ , %	$P_{10}$ , Вт	$P_{кн}$ , Вт
1	6	3	4	5	6	7	8
29	63	20	0,4	5,4	2,8	270	1149
30	100	10	0,4	5,2	2,5	348	2199
31	100	35	0,4	6,6	2,5	450	2199
32	160	10	0,4	6,6	2,3	528	2898
33	160	35	0,4	6,6	2,3	648	3000
34	250	10	0,4	6,6	2,3	750	3900
35	250	35	0,4	6,8	2,3	948	3900
36	400	10	0,4	4,5	2,3	1050	6399
37	400	10	0,4	6,6	2,1	1299	5400
38	630	10	0,4	5,6	2	1599	7500
39	630	35	0,4	6,6	2	1899	8400
40	63	20	0,4	5,4	4,3	378	1248
41	160	20	0,4	6,6	4	720	2499
42	250	20	0,4	6,6	3,6	948	3399
43	400	20	0,4	6,1	3,4	1500	4998
44	630	20	0,4	6,4	3,1	2100	7299
45	1000	10	0,4	5,4	1,5	2448	12198
46	1000	35	0,4	6,4	1,5	2700	12198
47	1600	10	0,4	5,6	1,3	3300	1899
48	1600	35	0,4	6,6	1,4	3648	18000
49	2500	10	0,4	5,6	1	4599	23499
50	2500	35	0,4	6,6	1,1	5100	23499

## Содержание задания

- 1) Определите параметры Т-образной схемы замещения трансформатора (сопротивления  $R_1, R_2, X_1, X_2, R_{10}, X_{10}$ ), считая ее симметричной ( $R_1 = R_2; X_1 = X_2$ ). Изобразите схему замещения. Укажите на ней сопротивления, токи, напряжения и ЭДС.
- 2) Постройте векторную диаграмму трансформатора при активной номинальной нагрузке.
- 3) Рассчитайте и постройте внешние характеристики трансформатора при:
  - а) активной нагрузке  $\cos\varphi=1$ ;
  - б) активно-индуктивной нагрузке  $\cos\varphi=0,8$ ;
  - в) активно-емкостной нагрузке  $\cos\varphi=0,8$ .

- 4) Рассчитайте и постройте зависимости КПД трансформатора от нагрузки при:
- активной нагрузке  $\cos\varphi=1$ ;
  - активно-реактивной нагрузке  $\cos\varphi=0,8$ .

Найти коэффициент загрузки, при котором наступает максимум КПД.

- 5) Рассчитайте токи (абсолютные значения и в процентах от номинального), протекающие по двум параллельно работающим трансформаторам с параметрами указанными в таблице, если у одного из них коэффициент трансформации на 5% меньше, чем по данным таблицы. Суммарная нагрузка трансформаторов равна удвоенной номинальной мощности.
- 6) Рассчитайте токи (абсолютные значения и в процентах от номинального), протекающие по двум параллельно работающим трансформаторам с параметрами указанными в таблице, если у одного из них напряжение короткого замыкания  $u_k$  меньше на 0,5%, чем по данным таблицы. Суммарная нагрузка трансформаторов равна удвоенной номинальной мощности.

#### 4. Методические указания по решению задачи

Рассмотрим решение задачи для трансформатора с параметрами, указанными в таблице 2.

Таблица 2 – Данные трансформатора

$S_N$ , кВА	$U_{1N}$ , кВ	$U_{2N}$ , кВ	$U_k$ , %	$I_{10}$ , %	$P_{10}$ , Вт	$P_{кн}$ , Вт
2500	35	0,4	6,6	1,1	15300	70500

##### 1) Определение параметров Т-образной схемы замещения трансформатора.

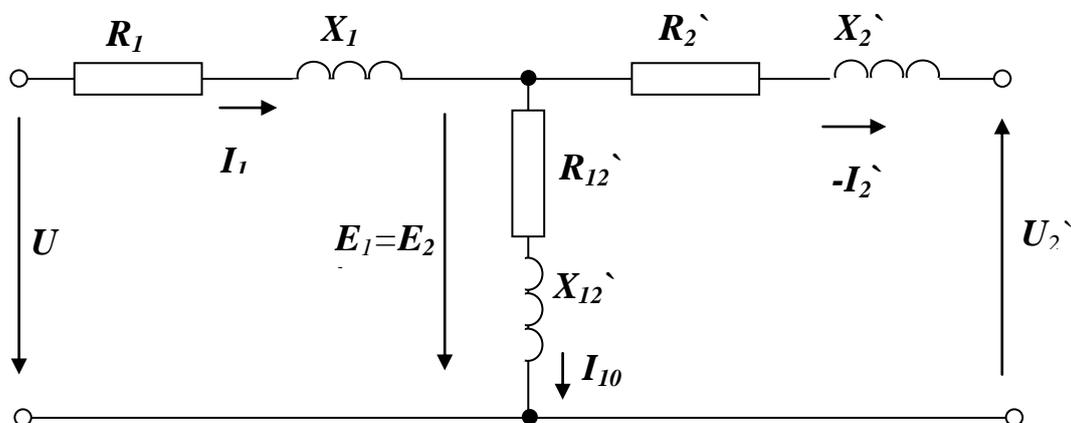


Рисунок 1 - Т-образная схема замещения трансформатора

На схеме:  $R_1, R_2'$  - активные сопротивления первичной обмотки и приведенное вторичной обмотки,  $X_1, X_2'$  - внутренние реактивные сопротивления первичной обмотки и приведенное вторичной обмотки,  $R_{12}, X_{12}$  - активное и реактивное сопротивления магнитной цепи,  $I_1, I_2'$  - токи первичной обмотки и приведенный ток вторичной,  $I_{10}$  - ток контура намагничивания.

В режиме короткого замыкания можно использовать упрощенную схему замещения (рисунок 2).

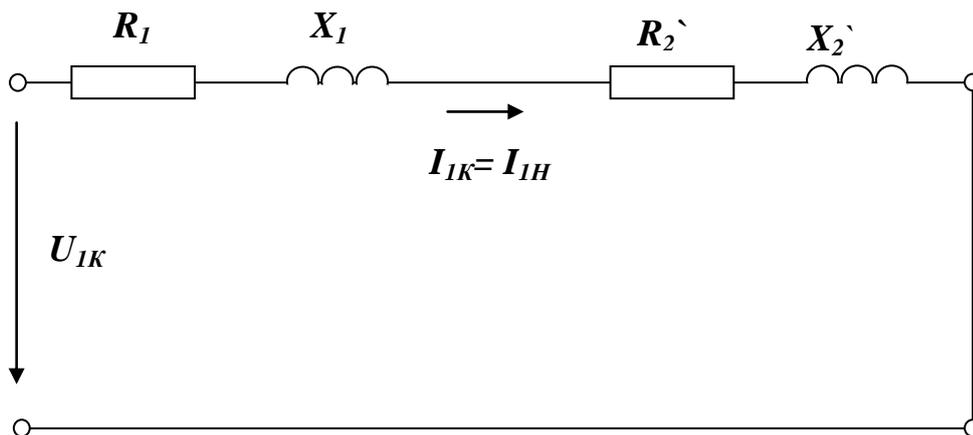


Рисунок 2 - Упрощенная схема замещения трансформатора

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора

$$I_{1H} = I_{1K} = S_H / (3 \cdot U_{1H}),$$

$$I_{1K} = 2500 / (3 \cdot 35) = 23,8 \text{ A.}$$

Абсолютное значение напряжения короткого замыкания

$$U_K = \frac{u_K \%}{100\%} U_{1H},$$

$$U_{1K} = (6,6 \cdot 35000) / 100 = 2310 \text{ B.}$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1H}};$$

$$Z_K = 2310 / 23,8 = 97,1 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания:

$$R_K = P_K / (3I_{1K}^2);$$

$$R_K = R_1 + R_2' = 70500 / (3 \cdot 23,8^2) = 13,8 \text{ Ом}$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания трансформатора найдем из треугольника сопротивлений

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2};$$

$$X_K = X_1 + X_2' = \sqrt{97,1^2 - 13,8^2} = 96,1 \text{ Ом.}$$

По условию задания трансформатор симметричный, значит  $R_1 = R_2'$  и  $X_1 = X_2'$ , тогда внутренние сопротивления обмоток

$$R_1 = R_2' = R_K / 2 = 13,8 / 2 = 6,9 \text{ Ом};$$

$$X_1 = X_2' = X_K / 2 = 96,1 / 2 = 48,1 \text{ Ом.}$$

В режиме холостого хода схема замещения трансформатора изображена на рисунке 3.

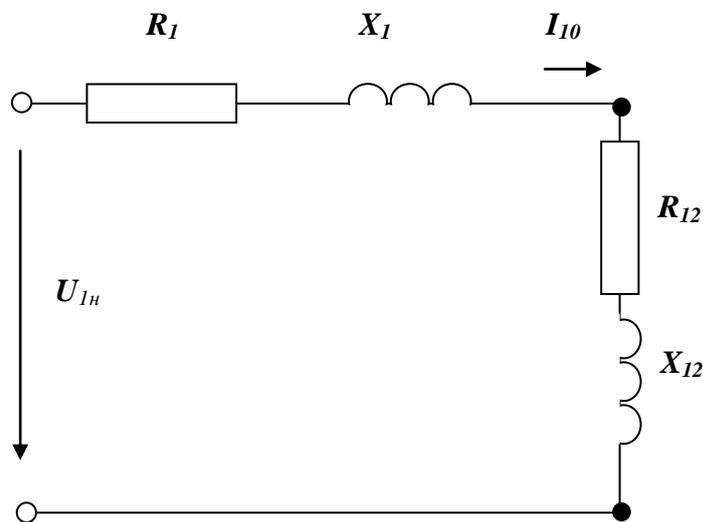


Рисунок 3 - Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

Абсолютное значение тока холостого хода трансформатора:

$$I_{10} = (I_{10}\% \cdot I_{1H}) / 100\%;$$

$$I_{10} = (1,1 \cdot 23,8) / 100 = 0,26 \text{ А.}$$

Полное сопротивление холостого хода

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{10}};$$

$$Z_0 = 35000/0,26 = 133690 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление холостого хода:

$$R_0 = R_1 + R_{12} = P_{10}/I_{10}^2;$$

$$R_0 = R_1 + R_{12} = 15300/0,26^2 = 24803 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление холостого хода трансформатора найдем из треугольника сопротивлений

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

$$X_0 = X_1 + X_{12} = \sqrt{133690^2 - 24803^2} = 131369 \text{ Ом.}$$

Согласно схеме замещения трансформатора на холостом ходу параметры эквивалентной магнитной цепи трансформатора

$$R_{12} = R_0 - R_1 = 24803 - 6,9 = 24796 \text{ Ом};$$

$$X_{12} = X_0 - X_1 = 131369 - 48,1 = 131231 \text{ Ом.}$$

Рассчитанные сопротивления схемы замещения:

$$R_1 = R_2 = 6,9 \text{ Ом} \quad X_1 = X_2 = 48,1 \text{ Ом}$$

$$R_{12} = 24796 \text{ Ом} \quad X_{12} = 131231 \text{ Ом.}$$

## 2) Построение векторной диаграммы при активной номинальной нагрузке.

Определяем номинальные токи трансформатора:  
В первичной обмотке

$$I_{1H} = S_H / (3 \cdot U_{1H});$$

$$I_{1H} = 2500 / (3 \cdot 35) = 23,8 \text{ А.}$$

Во вторичной обмотке

$$I_{2H} = S_H / (3 \cdot U_{2H});$$

$$I_{2H} = 2500 / (3 \cdot 0,4) = 2083 \text{ А.}$$

Коэффициент трансформации

$$k \approx U_{1H} / U_{2H} = 35 / 0,4 = 87,5.$$

Падение напряжений в первичной обмотке при номинальной нагрузке:  
активное

$$\Delta U_{1a} = I_{1H} \cdot R_1 = 23,8 \cdot 6,9 = 164,2 \text{ В};$$

реактивное

$$\Delta U_{1p} = I_{1H} \cdot X_1 = 23,8 \cdot 48,1 = 1145 \text{ В}.$$

Приведенные значения падения напряжений во вторичной обмотке при номинальной нагрузке:

активное

$$\Delta U'_{2a} = I_{1H} \cdot R'_2 = 23,8 \cdot 6,9 = 164,2 \text{ В};$$

реактивное

$$\Delta U'_{2p} = I_{1H} \cdot X'_2 = 23,8 \cdot 48,1 = 1145 \text{ В}.$$

Угол потерь  $\delta$  в магнитопроводе трансформатора (угол между магнитным потоком и током холостого хода)

$$\delta = \arctg(R_{12}/X_{12});$$

$$\delta = \arctg(24796 / 131231) = \arctg 0,189 = 10,7^\circ.$$

ЭДС первичной обмотки:

$$E_1 = E'_2 = I_{10} \sqrt{R_{12}^2 + X_{12}^2};$$

$$E_1 = E'_2 = 0,26 \sqrt{24796^2 + 131231^2} = 34724 \text{ В}.$$

Номинальное сопротивление нагрузки

$$R'_H = U'_2 / I_2 \approx U_1 / I_1 = 35000 / 23,8 = 1471 \text{ Ом}.$$

Угол сдвига фаз, на который вектор ЭДС вторичной обмотки  $E'_2$  опережает вектор приведенного тока вторичной обмотки  $I_{2H}$

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2}{R'_2 + R'_H} = \arctg \frac{48,1}{1471 + 6,9} = \arctg 0,033 = 1,9^\circ.$$

Построение векторной диаграммы начинаем с вектора магнитного потока  $\Phi_m$ , направляя его вправо по горизонтали. Перпендикулярно ему под углом  $90^\circ$  откладываем вектор ЭДС вторичной обмотки  $E'_2$ . Для дальнейших построений откладываем вектор  $-E_1$ . Под углом  $\psi_2$  проводим вектор тока вторичной обмотки  $I_{2H}$ , который совпадает по направлению с напряжением вторичной обмотки  $U_2$ , т.к. нагрузка активная. Вектор тока холостого хода откладываем под углом  $\delta$  к вектору  $\Phi_m$ .

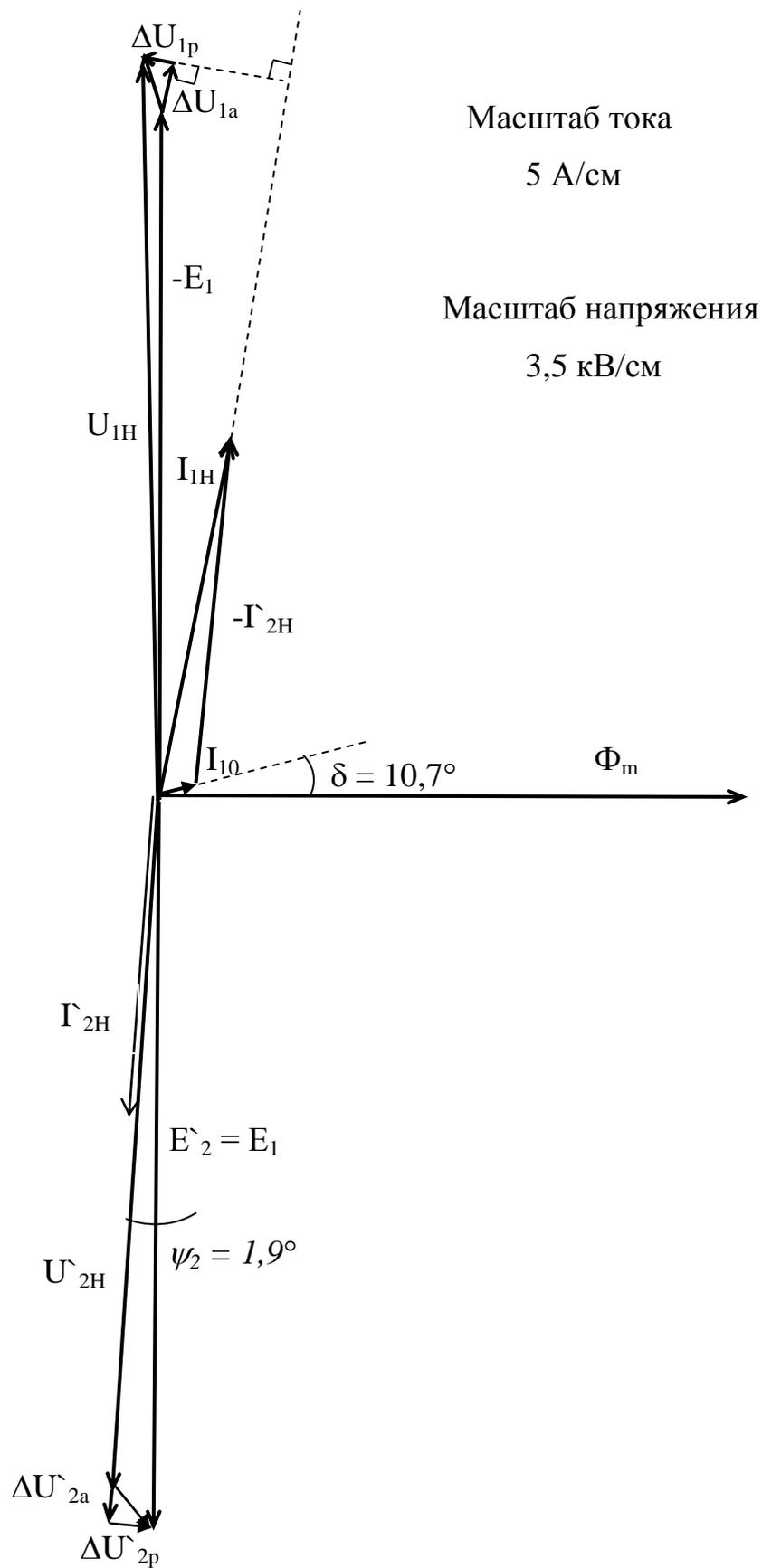


Рисунок 4 - Векторная диаграмма трансформатора

Используя соотношение для токов

$$I_1 = -I_{2H} + I_{10},$$

из конца вектора  $I_{10}$  откладываем  $-I_{2H}$ , вектор  $I_{1H}$  получаем как их сумму. Согласно выражения

$$U_2 = E_2 - I_{2H}R_2 - jI_{2H}X_2 = E_2 - \Delta U_{2a} - \Delta U_{2p}$$

откладываем вектора падения напряжений  $\Delta U_{2a}$  (против направления тока  $I_{2H}$ ) и  $\Delta U_{2p}$  (перпендикулярно вектору  $I_{2H}$ ).

Вектор напряжения первичной обмотки строим исходя из соотношения  $U_1 = -E_1 + I_1R_1 + jI_1X_1 = -E_1 + \Delta U_{1a} + \Delta U_{1p}$  как сумму векторов.

### 3) Построение внешней характеристики трансформатора.

Внешние характеристики трансформатора являются прямыми линиями, их строим по двум точкам – точке холостого хода (коэффициент нагрузки  $K_3 = 0$ ,  $U_2 = U_{2H}$ ) и номинальной точке ( $K_3 = 1$ ), для которой рассчитаем выходное напряжение.

Падение напряжения рассчитываем по формуле

$$\Delta U\% = K_3 (U_K\% \cos \varphi_K \cos \varphi_2 + U_K\% \sin \varphi_K \sin \varphi_2).$$

где  $K_3 = I_2/I_{2H}$  – коэффициент загрузки трансформатора,

$$\cos \varphi_K = R_K/Z_K = 13,8/97,1 = 0,14;$$

$$\sin \varphi_K = X_K/Z_K = 96,1/97,1 = 0,989.$$

Тогда абсолютное значение выходного напряжения

$$U_2 = \frac{1 - \Delta U\%}{100\%} U_{2H}$$

Результаты вычислений для трех случаев (по заданию) сведем в таблицу 3.

Таблица 3 - Результаты расчета внешних характеристик трансформатора

Характер нагрузки	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$\Delta U\%$	$U_2, B$
активная	1	0	0,92	396,3
Активно-индуктивная	0,8	0,6	4,7	381,2
Активно-емкостная	0,8	-0,6	-3,22	412,9

Внешние характеристики изображены на рисунке 5.

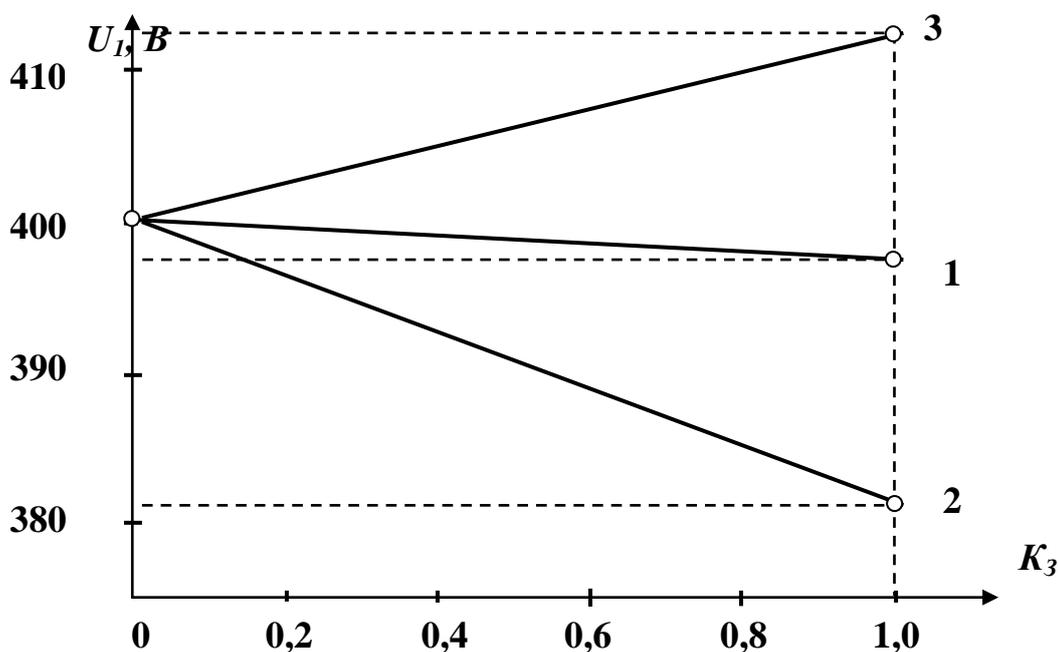


Рисунок 5. Внешние характеристики трансформатора:

- 1 -  $\cos\varphi_2 = 1$ ; (активная нагрузка);
- 2 -  $\cos\varphi_2 = 0,8$  (активно-индуктивная нагрузка);
- 3 -  $\cos\varphi_2 = 0,8$  (активно-емкостная нагрузка).

#### 4) Построение зависимости КПД трансформатора от нагрузки.

КПД трансформатора определяем методом отдельных потерь по формуле:

$$\eta = \frac{K_3 \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2}{K_3 \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + K_3^2 \cdot P_{к.н}}$$

Рассчитаем значения КПД при различном коэффициенте нагрузки для случая активной и активно-реактивной ( $\cos\varphi_2 = 0,8$ ) нагрузки.

Результаты вычислений сведем в таблицу 4.

Таблица 4 - Результаты расчета зависимости КПД трансформатора от нагрузки

$K_3$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	0,466
$\eta_1$	0	0,988	0,991	0,991	0,990	0,988	0,987	0,991
$\eta_{0,8}$	0	0,985	0,989	0,989	0,987	0,986	0,984	0,989

Графики зависимости КПД трансформатора от нагрузки изображены на рисунке 6.

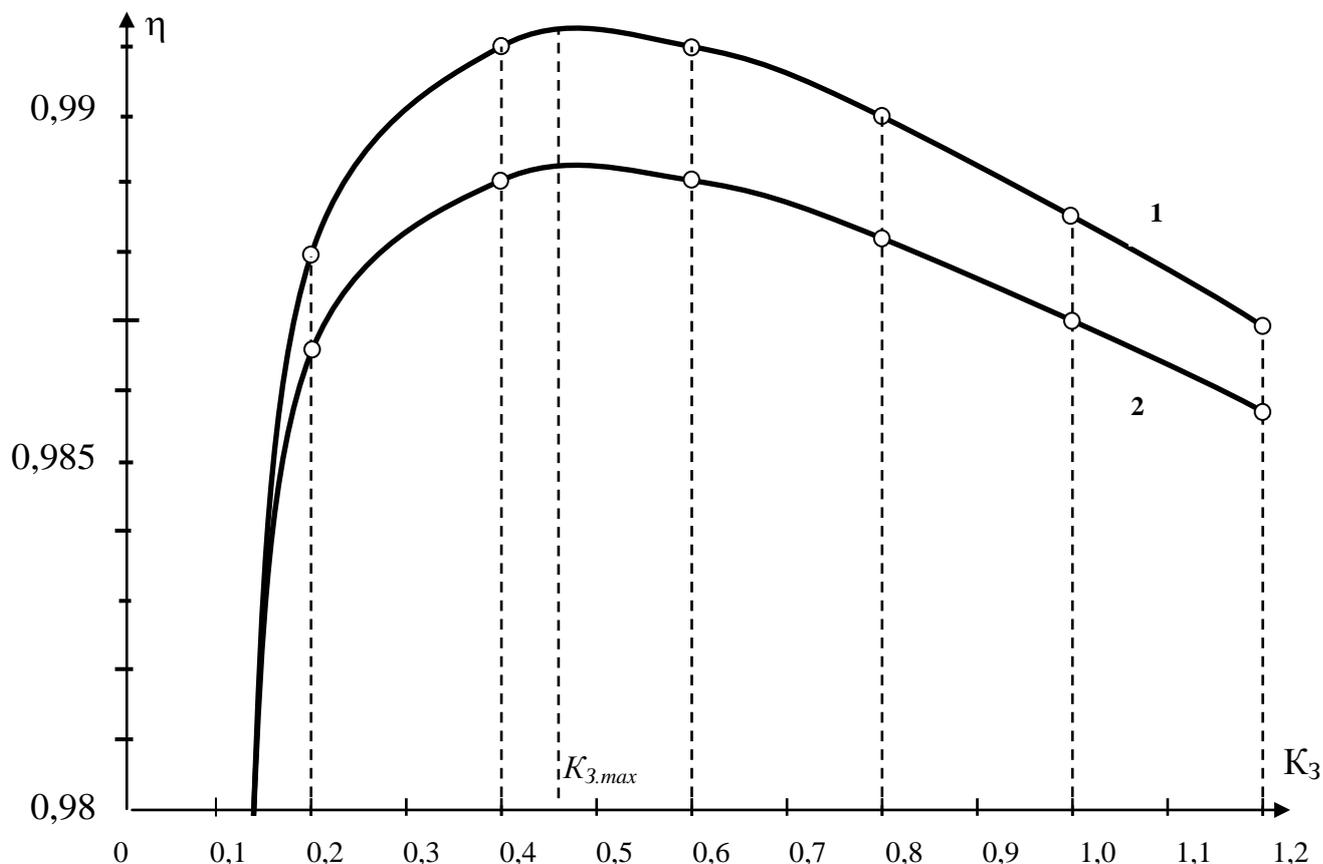


Рисунок 6 - Графики зависимости КПД трансформатора от нагрузки:

1 – при  $\cos\varphi_2 = 1$ ; 2 – при  $\cos\varphi_2 = 0,8$

Максимум КПД трансформатора будет при:

$$K_{3,max} = \sqrt{\frac{P_C}{P_{м.н}}} = \sqrt{\frac{15300}{70500}} = 0,466.$$

Максимальные значения КПД внесены в таблицу 4 в последнем столбце.

### 5) Определение токов при параллельной работе трансформаторов с неравными коэффициентами трансформации.

При параллельной работе трансформаторов с неравными коэффициентами трансформации, из-за неравенства ЭДС возникает уравнительный ток, текущий только по обмоткам трансформатора, минуя нагрузку. Ток трансформатора с большим коэффициентом трансформации увеличивается на величину уравнительного тока  $I_v$ , ток другого трансформатора уменьшается на ту же величину.

Для определения уравнильного тока находим средний коэффициент трансформации

$$k_{cp} = \sqrt{k_1 k_2},$$
$$k_{cp} = \sqrt{87,5 \cdot 91,88} = 89,67.$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты трансформации параллельно работающих трансформаторов. Согласно условию задачи  $k_1 = 1,05$   $k_2 = 87,5 \cdot 1,05 = 91,88$ .

Отклонение коэффициентов трансформации от среднего значения

$$\Delta k \% = \frac{k_1 - k_2}{k_{cp}} 100\%$$
$$\Delta k \% = \frac{91,88 - 87,5}{89,67} 100\% = 4,9.$$

Уравнильный ток в процентах от номинального

$$I_y \% = \frac{\Delta k \%}{2u_k \%} 100\%,$$
$$I_y \% = \frac{4,9}{2 \cdot 6,6} 100\% = 37\%$$

Абсолютное значение уравнильного тока

$$I_y = \frac{I_y \%}{100\%} I_{2н},$$
$$I_y = \frac{37}{100} 2083 = 771 \text{ А.}$$

Фазовый сдвиг уравнильного тока совпадает с фазовым сдвигом в опыте короткого замыкания, найденным ранее. Тогда комплекс уравнильного тока

$$I_y = 771 \cdot \cos \varphi_K + j \cdot 771 \cdot \sin \varphi_K = 771 \cdot 0,14 + j \cdot 771 \cdot 0,989 = 108 + j \cdot 747.$$

Комплексные значения токов трансформаторов при активной нагрузке

$$I_1 = I_n - I_y = 2083 - 108 - j \cdot 747 = 1975 - j \cdot 747,$$
$$I_2 = I_n + I_y = 2083 + 108 + j \cdot 747 = 2191 + j \cdot 747.$$

Действующие значения токов

$$I_1 = \sqrt{1975^2 + 747^2} = 2112 \text{ А},$$

$$I_1 = \sqrt{2191^2 + 747^2} = 2315 \text{ А}.$$

**б) Определение токов при параллельной работе трансформаторов с неравными напряжениями короткого замыкания.**

При параллельной работе трансформаторов с разными напряжениями короткого замыкания  $u_k\%$ , из-за неодинакового внутреннего сопротивления трансформаторов, их загрузка также отличается.

Согласно условию задачи  $u_{к1}\% = 6,6\%$ ,  $u_{к2}\% = 6,1\%$ .

Отношение коэффициентов загрузки трансформаторов определяется формулой

$$\frac{k_{31}}{k_{32}} = \frac{u_{к2}\%}{u_{к1}\%}.$$

Зная, что  $k_{31} + k_{32} = 2$ , решим систему

$$\begin{cases} \frac{k_{31}}{k_{32}} = \frac{u_{к2}\%}{u_{к1}\%}, \\ k_{31} + k_{32} = 2. \end{cases}$$

и находим  $k_{31}$ ,  $k_{32}$ .

$$\begin{cases} \frac{k_{31}}{k_{32}} = \frac{6,6\%}{6,1\%} = 1,08, \\ k_{31} + k_{32} = 2. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{2 - k_{32}}{k_{32}} = 1,08, \\ k_{31} = 2 - k_{32}. \end{cases}$$

$$\frac{2}{k_{32}} - 1 = 1,08,$$

$$k_{32} = \frac{2}{2,08} = 0,96,$$

$$k_{31} = 2 - 0,96 = 1,04.$$

Токи трансформаторов

$$I_1 = I_{2H} k_{31} = 1,04 \cdot 2083 = 2166 \text{ A},$$

$$I_2 = I_{2H} k_{32} = 0,96 \cdot 2083 = 2000 \text{ A}.$$

## Содержание

Общие методические рекомендации по изучению дисциплины.....	3
1. Содержание разделов дисциплины.....	4
2. Рекомендуемая литература.....	8
3. Задание для контрольной работы.....	9
4. Методические указания по решению задач.....	11

**Учебное издание**

Безик Валерий Александрович

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.  
ТРАНСФОРМАТОРЫ**

Редактор Лебедева Е.М.

---

Подписано к печати 04.02.2010 г.      Формат 60x84. 1/16.  
Бумага офсетная.    Усл.п.л. 1,39.    Тираж 100 экз.    Изд.№ 1583.

---

Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии  
243365, Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянская ГСХА.