

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова

## **РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Методические указания к выполнению практических работ  
для студентов очной и заочной форм обучения  
специальности 140211 – Электроснабжение и  
направления бакалавриата 140200 «Электроэнергетика»

Белгород  
2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова  
Кафедра электроэнергетики

Утверждено  
научно-методическим советом  
университета

## **РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Методические указания к выполнению практических работ  
для студентов очной и заочной форм обучения  
специальности 140211 – Электроснабжение и направления  
бакалавриата 140200 «Электроэнергетика»

Белгород  
2011

УДК 621.31(07)  
ББК 31.2 я7  
Р31

Составители: канд. техн. наук, проф. *А.А. Виноградов*  
ассистент *А.М. Нестеров*  
ассистент *С.В. Килин*  
ассистент *П.А. Еланцев*

Рецензенты канд. техн. наук, доцент Харьковской национальной академии городского хозяйства *А.В. Сапрыка*

**Р31 Релейная защита** в электроэнергетических системах: методические указания к выполнению практических работ студентов очной и заочной форм обучения специальности 140211 – Электроснабжение и направления бакалавриата 140200 «Электроэнергетика» /сост.: А.А.Виноградов, А.М. Нестеров, С.В. Килин, П.А. Еланцев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – 20 с.

В данной работе рассмотрены и указаны краткие теоретические сведения о защитах, методике выбора устройств, даны примеры расчета уставок устройств релейной защиты и автоматики.

Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов очной и заочной форм обучения специальности 140211 – Электроснабжение и направления бакалавриата 140200 «Электроэнергетика»

Издание публикуется в авторской редакции.

**УДК 621.31(07)**  
**ББК 31.2 я7**

© Белгородский государственный  
технологический университет  
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2011

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Основные технические требования к релейной защите.....                                  | 4  |
| Расчет уставок токовых защит.....   | 4  |
| Пример расчета уставок токовых защит.....   | 6  |
| Расчет уставок дистанционных защит .....  | 8  |
| Пример расчета уставок дистанционной защиты на основе терминала<br>«Сириус-ДЗ-35».....  | 10 |
| Расчет дифференциальной защиты трансформатора .....                                     | 12 |
| Пример расчета ДЗТ на реле РНТ-565.....   | 13 |
| Пример расчета ДЗТ на реле ДЗТ-11 .....   | 16 |
| Пример расчета уставок ДЗТ на основе микропроцессорного<br>устройства «Сириус-ТЗ» ..... | 17 |
| Библиографический список .....  | 19 |

## **Основные технические требования к релейной защите**

Селективность (избирательность) – способность релейной защиты отключать поврежденный участок ближайшими выключателями. При использовании АВР или АПВ перерыв в электроснабжении будет не больше нескольких секунд. Неселективное действие защиты часто является причиной аварии, особенно при отсутствии резервного питания.

Требование селективности не исключает возможности действия защиты как резервной, в случае отказа защиты или выключателей на следующих (по направлению тока КЗ) участках сети. Такой способ резервирования называется *дальним резервированием*.

Чувствительность – способность РЗ реагировать на повреждения и ненормальные режимы, которые могут возникать в пределах основной защищаемой зоны и зоны резервирования. Минимально допустимая чувствительность защит регламентируется ПУЭ.

Быстродействие – способность защиты отключать повреждения с минимальной выдержкой времени.

Надежность – способность защиты сохранять свою работоспособность во всех предусмотренных режимах и условиях. Под надежностью понимают надежное срабатывание защит, когда они должны сработать, и надежное несрабатывание, когда не должны срабатывать.

### **Расчет уставок токовых защит**

Токовые защиты – защиты, действие которых связано с повышением значения силы тока на защищаемом участке электрической сети. Устройства данной защиты контролируют величину силы тока на защищаемом участке. В случае увеличения силы тока выше определённого значения защита срабатывает на отключение этого участка. Значение величины силы тока, при котором срабатывает защита, называется уставкой. Уставку обычно выбирают таким образом, чтобы цепь обесточилась быстрее, чем в ней произойдут серьёзные разрушения.

Величина электрического тока, протекающего через цепь во время короткого замыкания, зависит от того, в каком месте это замыкание произошло. Чем это место ближе к источнику тока, тем больше величина силы тока. Это свойство позволяет обеспечить токовой отсечкой требование селективности. Для того, чтобы защита срабатывала непосредственно на том участке, на котором она установлена, её уставку принимают большей, чем значение силы тока короткого замыкания вне защищаемого участка. В этом случае защита не работает, если короткое замыкание произойдёт вне защищаемого участка.

Принцип действия МТЗ аналогичен принципу действия токовой отсечки. В случае повышения силы тока в защищаемой сети защита начинает свою работу. Однако, если токовая отсечка действует мгновенно, то максимальная токовая защита даёт сигнал на отключение только по истечении определённого промежутка времени, называемого выдержкой времени.

Выдержка времени зависит от того, где располагается защищаемый участок. Наименьшая выдержка времени устанавливается на наиболее удалённом от источника участке. МТЗ соседнего (более близкого к источнику энергии) участка действует с большей выдержкой времени, отличающейся на величину, называемую ступенью селективности. Ступень селективности определяется временем действия защиты, от которой отстроили эту выдержку времени. В случае короткого замыкания на участке срабатывает его защита. Если по каким-то причинам защита не сработала, то через определённое время (равное ступени селективности) после начала короткого замыкания сработает МТЗ более близкого к источнику участка и отключит как повреждённый, так и свой участок. По этой причине важно, чтобы ступень селективности была больше времени срабатывания защиты, иначе защита смежного участка отключит как повреждённый, так и рабочий участок до того, как собственная защита повреждённого участка успеет сработать. Однако важно так же сделать ступень селективности достаточно небольшой, чтобы защита успела сработать до того, как ток короткого замыкания нанесёт серьёзный ущерб электрической сети.

При выборе уставки следует так же учитывать характер работы защищаемой сети. Например, при самозапуске электродвигателей после перерыва питания, значение силы тока в сети может быть выше номинального, и защита не должна его отключать.

### Расчет ТО

Отстройка производится от максимального тока КЗ в конце защищаемого участка по формуле

$$I_{с.з.}^{TO1} \geq K_{отстр} \cdot I_{к.з.}^{(3)max}$$

где  $K_{отстр}$  берется из табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов отстройки

| Тип реле                                       | Линия   | Трансформатор |
|--|---------|---------------|
| РТ-40 (ЭТ-520)                                 | 1,2-1,3 | 1,3-1,4       |
| РТ-80 (ИТ-80)                                  | 1,5-1,6 | 1,6           |
| РТМ  | 1,4-1,5 | 1,6           |
| первичные реле выключателей типа ВМН, ВМНА, ВС | 1,5-1,6 | -             |
| Микропроцессорные защиты                       | 1,2     | 1,3           |

### Расчет ТО с выдержкой времени

Отстройка производится от максимального тока КЗ в конце зоны действия быстродействующей защиты следующего участка. Если быстродействующая защита следующего участка – ТО без выдержки времени, то расчетная формула примет вид

$$I_{с.з.}^{TO2} \geq K_{отстр} \cdot I_{с.з.}$$

где  $I_{с.з.}$  – ток срабатывания ТО без выдержки времени следующего участка

$K_{отстр} = 1,1-1,2$  так как за время выдержки апериодическая составляющая практически полностью затухает

Уставка по времени отстраивается от быстродействующей защиты следующего участка и имеет значение 0,4-0,6 с.

### Расчет МТЗ

1. Отстройка производится от максимального рабочего тока с учетом самозапуска и надежного возврата контактов реле

$$I_{сз} \geq \left( \frac{K_{отстр} \cdot K_{самозап.}}{K_{\varepsilon}} \right) \cdot I_{раб.}^{max}$$

где  $K_{самозап.}$  - коэф. самозапуска

$K_{отстр.}$  (коэф. отстройки) и  $K_{\varepsilon}$  (коэф. возврата) зависит от применяемого оборудования (см. табл. 2)

Таблица 2

Значения коэффициентов отстройки

| Тип реле                 | $K_{отстр.}$ | $K_{\varepsilon}$ |
|--------------------------|--------------|-------------------|
| РТ-40, РТ-80, РТ-90      | 1,1-1,2      | 0,8-0,85          |
| РТВ                      | 1,2-1,4      | 0,6-0,7           |
| Микропроцессорные защиты | 1,1-1,2      | 0,9-0,95          |

2. Если возможна работа АВР, то МТЗ отстраивается от режима работы АВР

$$I_{сз} \geq K_{отстр.} \cdot (K_{самозап.} \cdot I_{раб.Л2.}^{max} + I_{раб.Л1.}^{max})$$

Уставка по времени отстраивается от МТЗ следующего участка.

### Пример расчета уставок токовых защит

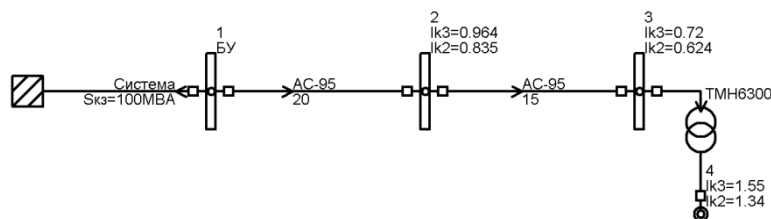


Рис.1. Схема замещения для расчета уставок токовой защиты

### Расчет токовых защит ПС №1

1. Расчет токовой отсечки (ТО)

$$I_{сз} = K_{отстр} \cdot I_{кз.}^{(3)max} = 1,2 \cdot 964 = 1157 \text{ A}$$

$$t_{сз} = 0 \text{ с}$$

2. Расчет токовой отсечки с выдержкой времени (ТО с выдержкой времени)

$$I_{сз} = K_{отстр} \cdot I_{сз.след.} = 1,2 \cdot 864 = 1036 \text{ A}$$

$$t_{сз} = 0,5 \text{ с}$$

3. Расчет максимальной токовой защиты (МТЗ)

$$I_{с.з.} \geq \left( \frac{K_{отстр.} \cdot K_{самоzap.}}{K_{\Phi}} \right) \cdot I_{раб.} = \left( \frac{K_{отстр.} \cdot K_{самоzap.}}{K_{\Phi}} \right) \cdot \frac{S_{ном тр-ра} + S_{нагр}}{\sqrt{3} \cdot U_{вн}}$$

$$I_{с.з.} = \left( \frac{1,1 \cdot 2}{0,95} \right) \cdot \frac{6300 + 4000 + 2500}{\sqrt{3} \cdot 35} = 490 \text{ A}$$

$t_{сз} = 1,6 + 0,4 = 2,0$  с (по условию согласования с нижестоящими защитами)

Определение коэффициента чувствительности МТЗ:

$$K_{\chi} = \frac{I_{мин}^{2\phi}}{I_{с.з.}}$$

$$K_{\chi} = \frac{835}{490} = 1,7$$

### Расчет токовых защит ПС №2

1. Расчет токовой отсечки (ТО)

$$I_{сз} = K_{отстр} \cdot I_{к.з.}^{(3)max} = 1,2 \cdot 720 = 864 \text{ A}$$

$t_{сз} = 0$  с

2. Расчет токовой отсечки с выдержкой времени (ТО с выдержкой времени)

$$I_{сз} = K_{отстр} \cdot I_{сз.след.} = 1,2 \cdot 605 = 726 \text{ A}$$

$t_{сз} = 0,5$  с

3. Расчет максимальной токовой защиты (МТЗ)

$$I_{с.з.} \geq \left( \frac{K_{отстр.} \cdot K_{самоzap.}}{K_{\Phi}} \right) \cdot I_{раб.} = \left( \frac{K_{отстр.} \cdot K_{самоzap.}}{K_{\Phi}} \right) \cdot \frac{S_{ном тр-ра} + S_{нагр}}{\sqrt{3} \cdot U_{вн}}$$

$$I_{с.з.} = \left( \frac{1,1 \cdot 2}{0,95} \right) \cdot \frac{6300 + 4000}{\sqrt{3} \cdot 35} = 395 \text{ A}$$

$t_{сз} = 1,2 + 0,4 = 1,6$  с (по условию согласования с нижестоящими защитами)

Определение коэффициента чувствительности МТЗ:

$$K_{\chi} = \frac{I_{мин}^{2\phi}}{I_{с.з.}}$$

$$K_{\chi} = \frac{624}{395} = 1,58$$

### Расчет токовых защит ПС №3

1. Расчет токовой отсечки (ТО)

$$I_{сз} = K_{отстр} \cdot I_{к.з.}^{(3)max} \cdot \frac{U_{мин}}{U_{вн}} = 1,3 \cdot 1550 \cdot \frac{10,5}{35} = 605 \text{ A}$$

$t_{сз} = 0$  с

2. Расчет максимальной токовой защиты (МТЗ)

$$I_{с.з.} \geq \left( \frac{K_{отстр.} \cdot K_{самоzap.}}{K_{\Phi}} \right) \cdot I_{раб.} = \left( \frac{K_{отстр.} \cdot K_{самоzap.}}{K_{\Phi}} \right) \cdot \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{вн}}$$

$$I_{с.з.} = \left( \frac{1,1 \cdot 2}{0,95} \right) \cdot \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 35} = 240 \text{ A}$$

$t_{сз} = 1,2$  с (по условию согласования с нижестоящими защитами)

Определение коэффициента чувствительности МТЗ:



$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{мин}}^{2\phi}}{I_{\text{с.з.}}}$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{1340 \cdot \frac{10^5}{88}}{240} = 1,6$$

### Расчет уставок дистанционных защит

Дистанционная защита – вид релейной защиты ЛЭП, выдержка времени срабатывания которой зависит от расстояния (дистанции) между местом установки защиты и точкой КЗ и уменьшается по мере его сокращения. Этим обеспечивается селективное отключение повреждённой ЛЭП. Основным элементом ДЗ является реле сопротивления, непосредственно или косвенно реагирующее на полное, активное или реактивное сопротивление участка линии от места его установки до точки КЗ. ДЗ применяется в электрических сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания, или когда токовые защиты не могут обеспечить достаточной чувствительности.

Чтобы защита не срабатывала ложно при неисправностях в цепях напряжения (при  $U=0$ ,  $Z = \frac{U}{I} = 0$ ) в схемах ДЗ имеется устройство контроля цепей напряжения, которое выводит из действия защиту при нарушениях в цепях напряжения.

#### Первая ступень ДЗ

Отстраивается от КЗ на шинах подстанции, примыкающих к противоположному концу линии.

$$Z_{\text{сз1}} \geq 0,85 \cdot Z_{\text{л1}}$$

#### Вторая ступень ДЗ

а) Отстраивается от зоны действия быстродействующей защиты следующего участка

$$Z_{\text{сз2}} \geq 0,85 \cdot Z_{\text{л1}} + 0,78 \cdot Z_{\text{сз}}^*$$

где  $Z_{\text{сз}}^*$  - зона действия быстродействующей защиты следующего участка

$Z_{\text{л1}}$  – сопротивление своей линии

б) Отстраивается от КЗ за трансформатором в конце линии, если он защищен ДЗТ (диф. защитой тр-ра)

$$Z_{\text{сз2}} \geq 0,85 \cdot (Z_{\text{л1}} + Z_{\text{тр}})$$

#### Третья ступень ДЗ

Отстройка производится от минимального сопротивления нагрузки с учетом самозапуска и надежного возврата контактов реле. Для этого сначала необходимо определить сопротивление нагрузки в минимальном режиме по формуле

$$Z_{нагр.мин} = \frac{0.9 \cdot U_{раб.мин}}{\sqrt{3} \cdot I_{раб.макс}}$$

а потом сопротивление срабатывания защиты третьей ступени по формуле

$$Z_{с.з3} \geq \frac{Z_{нагр.мин}}{K_{отстр} \cdot K_{самозап} \cdot K_{с}}$$

где  $K_{отстр}$  - 1,2 коэффициент отстройки

$K_{самозап}$  - коэффициент самозапуска

$K_{с}$  - коэффициент возврата

### Пример расчета уставок дистанционной защиты на основе терминала «Сириус-ДЗ-35»

Характеристика срабатывания измерительного органа первой и второй ступени ДЗ терминала «Сириус-ДЗ-35» изображена на рис. 2.

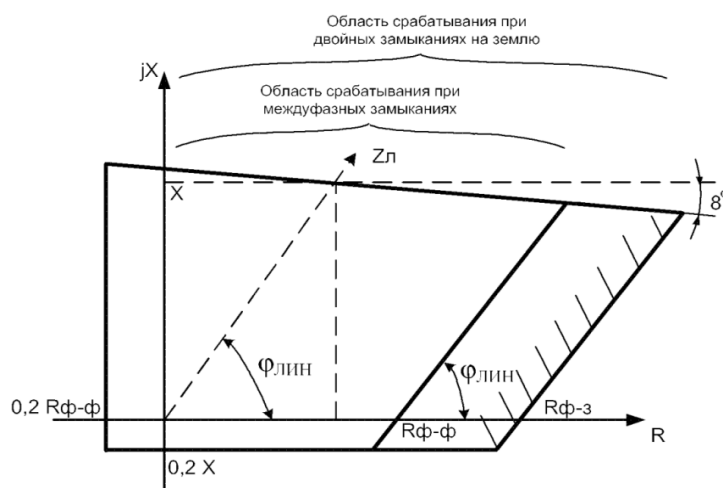


Рис. 2. Характеристика срабатывания терминала «Сириус-ДЗ-35»

В устройстве «Сириус-ДЗ-35» имеется специальный орган выявления двойных замыканий на землю, при срабатывании которого 1-я и 2-я ступени ДЗ переходят на контроль петель «фаза-земля» (А0 и С0). Контроль только двух петель обеспечивает отключение одной точки повреждения в 67% случаев двойных замыканий на землю. В режиме без двойных замыканий на землю ступени ДЗ контролируют только междуфазные сопротивления.

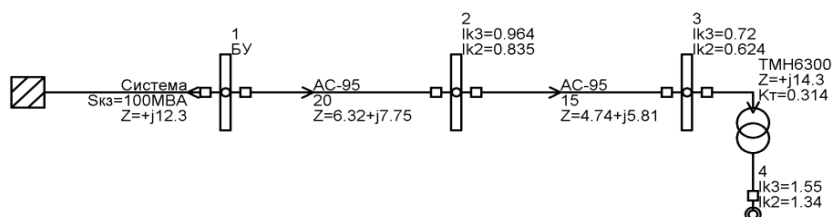


Рис.3. Схема для расчета дифференциальной защиты

## Расчет ДЗ ПС №2

### 1. Расчет первой ступени ДЗ (ДЗ1)

Отстраиваемся от конца линии 2-3 (см. рис.2)

$$X_{сз1} = 0,85 \cdot X_{12-3}$$

$$X_{сз1} = 0,85 \cdot 5,81 = 4,94 \text{ Ом}$$

$$R_{сз1\phi-\phi} = X_{сз1} = 4,94 \text{ Ом}$$

$$R_{сз1\phi-3} = 2X_{сз1} = 9,88 \text{ Ом}$$

$$t_{сз} = 0 \text{ с}$$

### 2. Расчет второй ступени ДЗ (ДЗ2)

Поскольку на трансформаторе стоит ДЗТ, отстройку производим от шин НН понижающего трансформатора.

$$X_{сз2} = 0,85 \cdot (X_{12-3} + X_m)$$

$$X_{сз2} = 0,85 \cdot (5,81 + 14,3) = 17,09 \text{ Ом}$$

$$X_{сз2\phi-\phi} = X_{сз2} = 17,09 \text{ Ом}$$

$$X_{сз1\phi-3} = 2X_{сз1} = 34,18 \text{ Ом}$$

$$t_{сз} = 0,5 \text{ с}$$

Определяем коэффициент чувствительности ДЗ2 к КЗ на ПС №3:

$$K_{ч2} = \frac{X_{сз2}}{X_{12-3}}$$

$$K_{ч2} = \frac{17,09}{5,81} = 2,94$$

Третья ступень ДЗ всегда контролирует только междуфазные сопротивления независимо от наличия замыкания на землю. Это связано с тем, что ступень предназначена для выполнения функции дальнего резервирования. Характеристика срабатывания измерительного органа третьей ступени ДЗ терминала «Сириус-ДЗ-35» изображена на рис. 4.

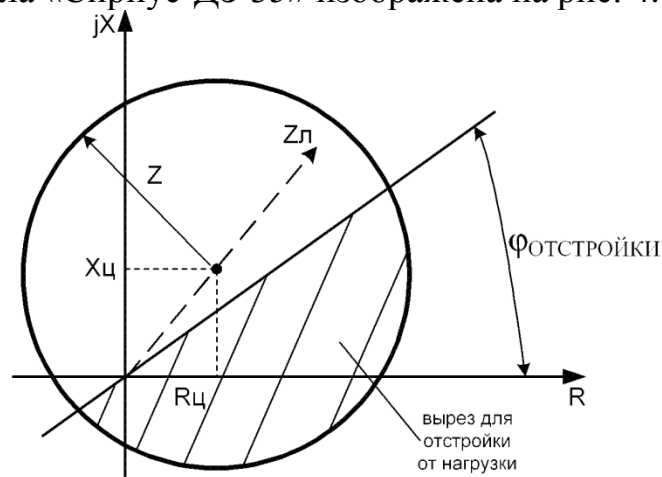


Рис.4. Характеристика срабатывания 3-ей ступени ДЗ

### 3. Расчет третьей ступени ДЗ (ДЗ3)

Полное сопротивление нагрузки линии:

$$X_{нагр} = \frac{(0,9 \cdot x_{ном})^2}{x_{ном}}$$

$$X_{нагр} = \frac{(0,9 \cdot 35)^2}{6300 + 4000} = 96 \text{ Ом}$$

Сопротивление срабатывания третьей ступени ДЗ с учетом самозапуска и надёжного возврата контактов реле после отключения сквозного тока КЗ

$$X_{с.з.3} = \frac{x_{нагр}}{K_{самозап} \cdot K_{отстр} \cdot K_{\epsilon}}$$

$$X_{с.з.3} = \frac{96}{2 \cdot 1,2 \cdot 1,05} = 38,1 \text{ Ом}$$

Определяем коэффициент чувствительности ДЗЗ на шинах НН тр-ра

$$Z_{ш10} = X_{л2-3} + X_{тр-ра}$$

$$Z_{ш10} = 5,81 + 14,3 = 20,11 \text{ Ом}$$

$$K_{ч.з} = \frac{x_{с.з}}{x_{ш10}}$$

$$K_{ч.з} = \frac{38,1}{20,11} = 1,89$$

Расчет характеристики срабатывания ДЗЗ (окружности)

Среднее значение угла линии и трансформатора для обеспечения дальнего резервирования

$$\varphi_{лт} = \arctg\left(\frac{x_{л2-3} + x_{тр-ра}}{x_{л}}\right) = 76^{\circ}$$

$$X_{ч.з} = \frac{x_{с.з.3}}{2} = 19,05 \text{ Ом}$$

$$R_{ц} = Z_{ц} \cdot \cos(\varphi_{лт}) = 4,06 \text{ Ом}$$

$$X_{ц} = Z_{ц} \cdot \sin(\varphi_{лт}) = 18,48 \text{ Ом}$$

Угол отстройки от нагрузки:

$$\varphi_{отстройки} = \varphi_{нагр} + \varphi_{доп}, \text{ где } \varphi_{нагр} = 25^{\circ}, \varphi_{доп} = 12^{\circ}$$

$$\varphi_{отстройки} = 25 + 12 = 37^{\circ}$$

### Расчет ДЗ ПС №1

#### 1. Расчет первой ступени ДЗ( ДЗ1)

отстраиваемся от конца линии 2-3

$$X_{сз1} = 0,85 \cdot X_{л1-2}$$

$$X_{сз1} = 0,85 \cdot 7,75 = 6,6 \text{ Ом}$$

$$X_{сз1\phi-\phi} = X_{сз1} = 6,6 \text{ Ом}$$

$$X_{сз1\phi-3} = 2X_{сз1} = 13,2 \text{ Ом}$$

$$t_{сз} = 0 \text{ с}$$

#### 2. Расчет второй ступени ДЗ (ДЗ2)

Отстройку производим от быстродействующей защиты ПС№2 (первой ступени ДЗ ПС№2).

$$X_{сз2} = 0,85 \cdot X_{л1-2} + 0,78 \cdot X_{сз1 \text{ ПС№2}}$$

$$X_{сз2} = 0,85 \cdot 7,75 + 0,78 \cdot 4,94 = 10,44 \text{ Ом}$$

$$X_{сз2\phi-\phi} = X_{сз1} = 10,44 \text{ Ом}$$

$$X_{сз1\phi-3} = 2X_{сз1} = 20,88 \text{ Ом}$$

$$t_{сз} = 0,5 \text{ с}$$

Определяем коэффициент чувствительности ДЗ:

$$K_{ч2} = \frac{X_{сз2}}{X_{л1-2}}$$

$$K_{ч2} = \frac{10,44}{7,75} = 1,35$$

### 3. Расчет третьей ступени ДЗ (ДЗ3)

Полное сопротивление нагрузки линии:

$$X_{нагр} = \frac{(0,9 \cdot x_{ном})^2}{x_{ном}}$$

$$X_{нагр} = \frac{(0,9 \cdot 35)^2}{6300 + 4000 + 2500} = 77,50 \text{ М}$$

Сопротивление срабатывания третьей ступени ДЗ с учетом самозапуска и надежного возврата после отключения сквозного тока КЗ

$$X_{с.з.3} = \frac{x_{нагр}}{K_{самозап} \cdot K_{отстр} \cdot K_{в}}$$

$$X_{с.з.3} = \frac{75}{2 \cdot 1,2 \cdot 1,05} = 30,75 \text{ Ом}$$

Определяем коэффициент чувствительности ДЗ3 при КЗ на ПС №3

$$Z_{\text{ПС №3}} = X_{л1-2} + X_{л2-3}$$

$$Z_{\text{ПС №3}} = 7,75 + 5,81 = 13,56 \text{ Ом}$$

$$K_{ч.3} = \frac{x_{с.з}}{Z_{\text{ПС №3}}}$$

$$K_{ч.3} = \frac{30,75}{13,56} = 2,27$$

Расчет характеристики срабатывания ДЗ3 (окружности)

Среднее значение угла линий для обеспечения дальнего резервирования

$$\varphi_{\text{лл}} = \arctg\left(\frac{X_{л1-2} + X_{л2-3}}{R_{л1-2} + R_{л2-3}}\right) = 50,79^\circ$$

$$X_{ц} = \frac{x_{с.з.3}}{2} = 15,38 \text{ Ом}$$

$$R_{ц} = Z_{ц} \cdot \cos(\varphi_{\text{лл}}) = 9,72 \text{ Ом}$$

$$X_{ц} = Z_{ц} \cdot \sin(\varphi_{\text{лл}}) = 11,92 \text{ Ом}$$

Угол отстройки от нагрузки:

$$\varphi_{\text{отстройки}} = \varphi_{\text{нагр}} + \varphi_{\text{доп}}$$

где  $\varphi_{\text{нагр}} = 27^\circ$ ,  $\varphi_{\text{доп}} = 12^\circ$   
 $\varphi_{\text{отстройки}} = 27 + 12 = 39^\circ$

### Расчет дифференциальной защиты трансформатора

Это основная быстродействующая защита от внутренних повреждений трансформатора (автотрансформатора). Включается она на встроенные или выносные трансформаторы тока со всех сторон защищаемого трансформатора. Принцип действия основывается на 1 законе Кирхгофа: сколько тока втекает в узел, столько из него и вытекает (если привести к одной ступени напряжения).

Схема подключения реле РНТ-565 представлена на рис. 5.

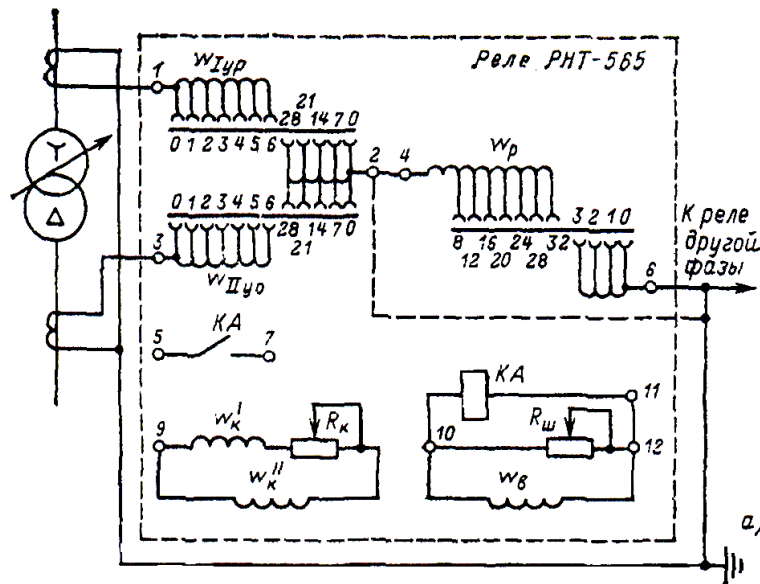


Рис.5. Схема подключения реле РНТ-565

### Пример расчета ДЗТ на реле РНТ-565

Исходные данные:

$$S_{\text{тр-ра}} = 2500 \text{ кВА}$$

$$\Delta U_{\text{РНТ}} = \pm 5\%$$

$$\text{Шины } 10 \text{ кВ: } I_{\text{кз}}^{\text{max}} = 1644 \text{ А} / 470^{(3)35} \text{ А}$$

$$I_{\text{кз}}^{\text{min}} = 1312 \text{ А} / 375^{(3)35}$$

1. Определение вторичных токов в плечах защиты

Вторичные токи защиты определяем по табл. 3.

Поскольку вторичный ток на стороне ВН больше, сторону ВН принимаем за основную. Все расчеты ведем в токах, приведенных к напряжению этой стороны.

Таблица 3

| Вторичные токи защиты               |  |   |
|-------------------------------------|--|---|
| Наименование величины               | сторона ВН                                     | сторона НН                                  |
|                                     | кВ   | кВ  |
| $I_{\text{ном. тр.}}, \text{ A}$    | $\frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 35} = 41,24$       | $\frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 137,46$ |
| $n_T$                               | 100/5  | 200/5                                       |
| схема соединения обмоток тр-ра тока | $\Delta$                                       | $Y$   |
| $I_2, \text{ A}$                    | $\frac{I_o = 41,24 \cdot \sqrt{3}}{20} = 3,57$ | $\frac{I_n = 137,46}{40} = 3,44$            |

## 2. Определение тока небаланса

$$I_{\text{нб}} = I'_{\text{нб}} + I''_{\text{нб}} = (0,1 + 0,05) \cdot 470 = 70,5 \text{ A}$$

где  $I'_{\text{нб}}$  - ток небаланса, обусловленный погрешностью трансформаторов тока

$I''_{\text{нб}}$  - ток небаланса, обусловленный действием РПН

## 3. Определяем ток срабатывания защиты

а) по условию отстройки от тока небаланса:

$$I_{\text{сз}} \geq 1,3 \cdot 70,5 = 91,65 \text{ A}$$

б) по условию отстройки от броска намагничивающего тока:

$$I_{\text{сз}} \geq 1,3 \cdot I_{\text{ном. тр}} = 1,3 \cdot 41,24 = 53,61$$

В качестве расчетного принимаем большее значение 91,65A

## 4. Проверяем чувствительность защиты в минимальном режиме при двухфазном КЗ:

$$I_{\text{p.min}} = \frac{1,5 \cdot 375}{100/5} = 28,125 \text{ A}$$

$$I_{\text{ср. п.}} = \frac{91,65 \cdot \sqrt{3}}{100/5} = 7,94 \text{ A}$$

$$k^{(2)}_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{p.min}}}{I_{\text{ср. п.}}} = \frac{28,125}{7,94} = 3,54 > 2$$

так как  $k^{(2)}_{\text{ч}} > 2$  применение реле РНТ-565 возможно, расчет продолжаем.

## 5. Определение числа витков обмоток НТТ сведено в табл. 4.

Таблица 4

| Числа витков НТТ |  |                            |
|------------------|--|----------------------------|
| №                | Обозначение величины и расчёт выражение                            | Числовое значение          |
| 1                | 2  | 3                          |
| 1                | $I_{\text{ср. п.о}}$ (сторона ВН)                                  | 7,94                       |
| 2                | $\omega_{\text{о.расч.}} = F_{\text{ср. п.}} / I_{\text{ср. п.о}}$ | $100 / 7,94 = 12,6$ витков |
| 3                | $\omega_{\text{о}}$ (ближайшее меньшее число)                      | 12 витков                  |

## Окончание табл. 4

| 1  | 2  | 3  |
|----|--|--|
| 4  | $I_{\text{ср. р.о.}} = F_{\text{ср. р.}} / \omega_{\text{н.}}$   | $100 / 12 = 8,33 \text{ А}$                                  |
| 5  | $I_{\text{ср. з.о.}} \text{ (сторона ВН)}$   | $\frac{8,33 \cdot 20}{\sqrt{3}} = 96,19 \text{ А}$           |
| 6  | $I_{\text{ср. з.н.}} \text{ (сторона НН)}$   | $96,19 \cdot 35 / 10,5 = 320,63 \text{ А}$                   |
| 7  | $\omega_{\text{н. расч.}} = \omega_{\text{о. расч.}} \cdot I_{2 \text{ осн.}} / I_{2 \text{ н.}}$            | $12 \cdot \frac{3,57}{3,44} = 12,45 \text{ ВИТКОВ}$          |
| 8  | $\omega_{\text{н.}}$ (ближайшее целое число)   | 12 ВИТКОВ  |
| 9  | $I'''_{\text{нб}}$   | $\frac{12,45 - 12}{12,45} \cdot 470 = 16,99 \text{ А}$       |
| 10 | $I_{\text{нб}}$ с учётом $I'''_{\text{нб}}$  | $70,5 + 16,99 = 87,49 \text{ А}$                             |
| 11 | $I_{\text{ср. з.о.}}$ с учётом $I'''_{\text{нб}}$  | $1,3 \cdot 87,49 = 113,74 \text{ А}$                         |
| 12 | $I_{\text{ср. р.о.}} \text{ (сторона ВН)}$   | $\frac{113,74 \cdot \sqrt{3}}{20} = 9,85 \text{ А}$          |
| 13 | $\omega_{\text{о. расч.}} = F_{\text{ср. р.}} / I_{\text{ср. р.о.}}$   | $100 / 9,85 = 10,15 \text{ ВИТКОВ}$                          |
| 14 | $\omega_{\text{о.}}$ (ближайшее меньшее число)   | 10 ВИТКОВ  |
| 16 | $I_{\text{ср. з.о.}} \text{ (сторона ВН)}$   | $\frac{10 \cdot 20}{\sqrt{3}} = 115,47 \text{ А}$            |
| 17 | $I_{\text{ср. з.н.}} \text{ (сторона НН)}$   | $115,47 \cdot 35 / 10,5 = 384,9 \text{ А}$                   |
| 18 | $\omega_{\text{н. расч.}} = \omega_{\text{о. расч.}} \cdot I_{2 \text{ осн.}} / I_{2 \text{ н.}}$            | $10 \cdot \frac{3,57}{3,44} = 10,38 \text{ ВИТКОВ}$          |
| 19 | $\omega_{\text{н.}}$ (ближайшее целое число)   | 10 ВИТКОВ  |
| 20 | $I'''_{\text{нб}}$   | $\frac{10,38 - 10}{10,38} \cdot 470 = 17,21 \text{ А}$       |
| 21 | $I_{\text{нб}}$ с учётом $I'''_{\text{нб}}$  | $70,5 + 17,21 = 87,71 \text{ А}$                             |
| 22 | $I_{\text{ср. з.о.}}$ с учётом $I'''_{\text{нб}}$  | $1,3 \cdot 87,71 = 114,02 \text{ А}$                         |
| 23 | Окончательно принятые числа витков<br>$\omega_{\text{о.}}$ (сторона ВН)<br>$\omega_{\text{н.}}$ (сторона НН) | 10 ВИТКОВ<br>10 ВИТКОВ                                       |
| 24 | Проверка: $I_{2 \text{ осн.}} \cdot \omega_{\text{осн.}} \approx I_{2 \text{ н.}} \cdot \omega_{\text{н.}}$  | $3,44 \cdot 10 \approx 3,57 \cdot 10$<br>$34,4 \approx 35,7$ |

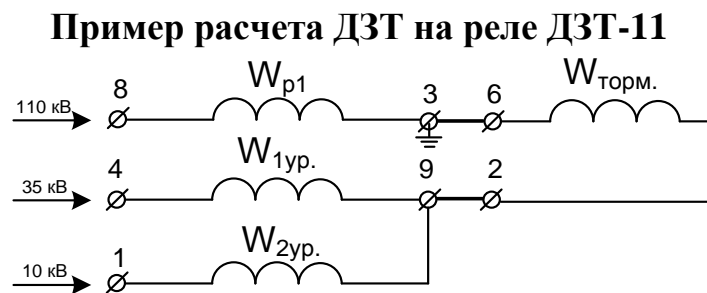


Рис.6. Расчетная схема ДЗТ-11



ТДТН 10000/110

$S_{тр-ра}=10000$  кВА,  $\Delta U_{рпн110}=16\%$ ,  $\Delta U_{рпн35}=5\%$

ш. 35 кВ  $I_{кз\max}=1280$  А

ш. 10 кВ  $I_{кз\max}=2860$  А  $I_{кз\min}=2600$  А

### 1. Определение вторичных токов в плечах защиты

Таблица 5

Вторичные токи защиты

| Наименование величин                | сторона ВН | сторона СН | сторона НН |
|-------------------------------------|------------|------------|------------|
|                                     | 110        | 38,5       | 11         |
| $I_{ном.тр.}, A$                    | 52,49      | 149,96     | 524,86     |
| $K_T$                               | 150/5      | 600/5      | 1000/5     |
| схема соединения обмоток тр-ра тока | $\Delta$   | $\Delta$   | Y          |
| $I_2, A$                            | 3,03       | 2,16       | 2,62       |

### 2. Определение тока срабатывания и количества витков основной стороны с учетом того, что количество витков должно быть целым

$$I_{cp}=1,5 \cdot I_{ном110}$$

$$I_{cp}=1,5 \cdot 52,49=78,73 \text{ А}$$

$$I_{cp.втор.}=I_{cp} \cdot \sqrt{3}/K_T$$

$$I_{cp.втор.}=78,73 \cdot \sqrt{3}/(150/5)=4,55 \text{ А}$$

$$W_{110}=100/I_{cp.втор.}$$

$$W_{110}=100/4,55=22 \quad (\text{округляем в меньшую сторону})$$

пересчет при целом количестве витков:

$$I_{cp}=100 \cdot K_T/(W_{110} \cdot \sqrt{3})$$

$$I_{cp}=100 \cdot (150/5)/(22 \cdot \sqrt{3})=78,73$$

### 3. Определение коэффициента чувствительности

$$K_{ч}=I_{\min}^{(2)}/I_{cp}$$

$$I_{\min}^{(2)}=\frac{\sqrt{3} \cdot I_{кз\min} \cdot \frac{U_{нн}}{U_{сн}}}{2}$$

$$I_{\min}^{(2)}=\frac{\sqrt{3} \cdot 2600}{2} \cdot \frac{11}{110}=225,16 \text{ А}$$

$$K_{ч}=I_{\min}^{(2)}/I_{cp}$$

$$K_{ч}=225,16/78,73=2,86$$

### 4. Определение количества витков со стороны 35 и 10 кВ

$$W_{35}=W_{110} \cdot I_{втор110}/I_{втор35}$$

$$W_{35}=22 \cdot 3,03/2,16=30,8 \text{ ближайшее целое } 31$$

$$W_{10}=W_{110} \cdot I_{втор110}/I_{втор10}$$

$$W_{10}=22 \cdot 3,03/2,62=25,4 \text{ ближайшее целое } 25$$

### 5. Определение тока небаланса и количества витков тормозной обмотки

$$I_{нб35}=(\varepsilon \cdot K_{апер} \cdot K_{одн} + \Delta U_{110} + \Delta U_{35} + (W_{35расч.} - W_{35}/W_{35расч.})) \cdot I_{кз35\max}$$

$$I_{нб35}=(0,1 \cdot 1 \cdot 1 + 0,16 + 0,05 + ((30,86 - 31)/30,86)) \cdot 1280 = 0,316 \cdot 1280 = 141,8 \text{ А}$$

$$W_{т35}=1,5 \cdot W_{35расч} \cdot 0,316/0,75=19,496$$

$$I_{нб10}=(\varepsilon \cdot K_{апер} \cdot K_{одн} + \Delta U_{110} + (W_{10расч.} - W_{10}/W_{10расч.})) \cdot I_{кз10\max}$$

$$I_{нб10} = (0,1 \cdot 1 + 0,16 + ((25,4 - 25) / 25,4)) \cdot 2860 = 0,276 \cdot 2860 = 78,9 \text{ А}$$

$$W_{т10} = 1,5 \cdot W_{10расч} \cdot 0,276 / 0,75 = 14,02$$

Для компенсации действия тока небаланса при внешнем КЗ за расчетное берем  $W_{т35} = 19,496$  и принимаем ближайшее большее из ряда ответвлений тормозной обмотки (1,3,5,7,9,11,13,18,24)  $W_{т} = 24$

### Пример расчета уставок ДЗТ на основе микропроцессорного устройства «Сириус-ТЗ»

Функции защиты, выполняемые устройством:

1. Двухступенчатая дифференциальная токовая защита трансформатора (токовая отсечка и защита с торможением от сквозного тока и отстройкой от бросков тока намагничивания).

2. Двухступенчатая МТЗ высшей стороны трансформатора с возможностью комбинированного пуска по напряжению от сторон низшего и среднего напряжения. Для увеличения чувствительности имеется возможность ввести блокировку по 2-й гармонике дифференциального тока. Это позволяет отстроиться от бросков намагничивающего тока без заглубления ступеней МТЗ ВН по времени и току.

3. Ступень МТЗ средней стороны трансформатора с возможностью комбинированного пуска по напряжению от стороны среднего напряжения.

4. Ступень МТЗ низшей стороны трансформатора с возможностью комбинированного пуска по напряжению от стороны низшего напряжения (по дискретному входу).

5. Защита от перегрузки по каждой стороне напряжения с действием на сигнализацию.

Ниже приведена методика расчета диф. отсечки и ДЗТ с торможением на примере трансформатора ТДТН 10000/110, из предыдущего примера

#### Расчет дифференциальной отсечки

Выбору подлежит:

$I_{диф}/I_{ном}$  - относительное значение уставки срабатывания отсечки.

Так как уставка отстроена от броска тока намагничивания даже при минимально возможном значении, производим отстройку от тока небаланса при внешнем КЗ по формуле

$$I_{диф}/I_{ном} \geq K_{отс} \cdot K_{нб(1)} \cdot I_{кз.вн.макс}$$

где  $K_{отс} = 1.2$  (коэффициент отстройки)

$K_{нб(1)} = 0.7$ , если номинальный вторичный ток трансформаторов тока 5А,  $K_{нб(1)} = 1$ , если 1А

$I_{кз.вн.макс}$  – отношение тока внешнего расчетного КЗ к номинальному току трансформатора.

Отстройка от срабатывания на стороне НН

$$I_{\text{КЗ.ВН.МАКС}^*} = \frac{2860 \cdot 11/110}{52,49} = 5.4$$

$$I_{\text{диф}}/I_{\text{НОМ}} \geq 1.2 \cdot 0.7 \cdot 5.4 = 4.5$$

Отстройка от срабатывания на стороне СН

$$I_{\text{КЗ.ВН.МАКС}^*} = \frac{1280 \cdot 38.5/110}{52,49} = 8.5$$

$$I_{\text{диф}}/I_{\text{НОМ}} \geq 1.2 \cdot 0.7 \cdot 8.5 = 7.14$$

принимаем уставку дифотсечки  $I_{\text{диф}}/I_{\text{НОМ}} = 8$

### Расчет ДЗТ с торможением

Выбору подлежит:

$I_{\text{д1}}/I_{\text{НОМ}}$  – базовая уставка ступени. Следует стремиться иметь уставку в пределах 0,3-0,5 для обеспечения чувствительности к полным витковым замыканиям в переплетенных обмотках и к межкатушечным замыканиям в любых обмотках.

$K_{\text{ТОРМ}}$  – коэффициент торможения (наклон тормозной характеристики на втором её участке) должен обеспечивать несрабатывание ступени при сквозных токах, соответствующих второму участку тормозной характеристики (от 1 до  $3I_{\text{НОМ}}$ ). Такие токи возможны при действии устройств АВР трансформаторов, АВР секционных выключателей, АПВ питающих линий.

$I_{\text{Т2}}/I_{\text{НОМ}}$  – Вторая точка излома тормозной характеристики.  $I_{\text{Т2}}/I_{\text{НОМ}}$  определяет размер второго участка тормозной характеристики. Для высокой чувствительности к витковым КЗ следует чтобы во второй участок попал режим номинальных нагрузок, режим допустимых длительных перегрузок ( $I_{\text{T}}/I_{\text{НОМ}} = 1,3$ ). желательно чтобы во второй участок попали и режимы возможных кратковременных перегрузок (самозапуск двигателей после АВР и пусковые токи мощных двигателей). Поэтому рекомендуется уставка  $I_{\text{T2}}/I_{\text{НОМ}} = 1,5 - 2$ . Тормозная характеристика ДЗТ представлена на рис. 7.

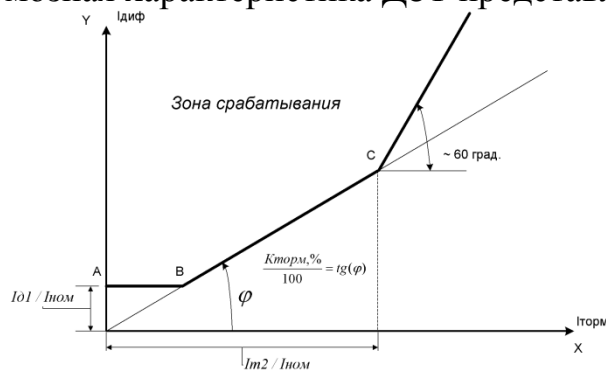


Рис. 7. Тормозная характеристика ДЗТ

1. Принимаем  $I_{\text{д1}}/I_{\text{НОМ}} = 0,3$

2. Определение дифференциального тока

$$I_{\text{ДИФ}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб.расч.}} = K_{\text{отс}} \cdot (K_{\text{пер}} \cdot K_{\text{одн}} \cdot \varepsilon + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{добав}}) \cdot I_{\text{СКВ}} =$$

$$= 1,3 \cdot (2 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,16 + 0,4) \cdot I_{\text{СКВ}} = 1,3 \cdot 0,4 \cdot I_{\text{СКВ}} = 0,52 \cdot I_{\text{СКВ}}$$

3. Определение коэффициента снижения тормозного тока

$$K_{\text{сн.т.}} = \sqrt{1(1 - 0,52)} = 0,69$$

4. Определение коэффициента торможения

$$K_{\text{торм}} \geq 100 \cdot I_{\text{ДИФ}} / I_{\text{ТОРМ}} = 100 K_{\text{отс}} \cdot (K_{\text{пер}} \cdot K_{\text{одн}} \cdot \varepsilon + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{добав}}) / K_{\text{сн.т.}} = \\ = 100 \cdot 0,52 / 0,69 = 75$$

5. Определение первой точки перелома и выбор второй

$$I_{\text{т1}} / I_{\text{НОМ}} = (I_{\text{д1}} / I_{\text{НОМ}}) \cdot 100 / K_{\text{ТОРМ}} = 0,3 \cdot 100 / 75 = 0,4$$

Принимаем  $I_{\text{т2}} / I_{\text{НОМ}} = 2$

### Библиографический список

1. Шабад М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. Л., «Энергия», 1972
2. Руководство по эксплуатации микропроцессорного устройства дистанционной защиты «Сириус-ДЗ-35» Радиус-Автоматика. – М. 88с
3. Рекомендации по выбору уставок микропроцессорного устройства дистанционной защиты «Сириус-ДЗ-35» Радиус-Автоматика. – М. 7с
4. Руководящие указания по релейной защите. Вып.7. Дистанционная защита линий 35-330 кВ.–М.: Энергия», 1966.
5. Руководящие указания по релейной защите. Вып.13Б Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ. – М.: Расчеты. «Энергоатомиздат» 1985.
6. Микропроцессорное устройство основной защиты трехобмоточного трансформатора «Сириус-ТЗ». Руководство по эксплуатации, паспорт. Радиус-Автоматика. – М. 75с
7. Рекомендации по выбору уставок устройств защиты трансформаторов «Сириус-Т» и «Сириус-ТЗ» Радиус-Автоматика. – М. 11с

## **РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Методические указания к выполнению практических работ  
для студентов очной и заочной форм обучения  
специальности 140211 – Электроснабжение и направления бакалавриата 140200  
«Электроэнергетика»

Составители: **Виноградов** Анатолий Алексеевич  
**Нестеров** Алексей Михайлович  
**Килин** Станислав Витальевич  
**Еланцев** Павел Александрович

Подписано в печать 30.12.11. Формат 60 x 84/16. Усл. печ. л. 3,4. Уч.-изд. л. 3,6.  
Тираж 119 экз.      Заказ      Цена  
Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете  
им. В.Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46