

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

**П. В. Лычев**

# **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

**ПРАКТИКУМ**

**по выполнению лабораторных работ  
для студентов специальности**

**1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»  
дневной формы обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2021**

УДК 621.311.1(075.8)  
ББК 31.27я73  
Л88

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 8 от 26.05.2020 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Автоматизированные электроприводы»  
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *М. Н. Погуляев*

**Лычев, П. В.**  
Л88      Оптимизация режимов энергосистем : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» днев. формы обучения / П. В. Лычев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 17 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-458-2.

Представлены теоретические сведения, изложен порядок выполнения лабораторных работ, даны контрольные вопросы.

Для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» дневной формы обучения.

УДК 621.311.1(075.8)  
ББК 31.27я73

ISBN 978-985-535-458-2

© Лычев П. В., 2021  
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2021

## Лабораторная работа № 1

### ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА СУММАРНЫХ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

**Цель работы:** определение оптимального значения напряжения по критерию минимума суммарных потерь  $\Delta P$  в линиях сверхвысокого напряжения (СВН).

#### Теоретические сведения

Линии СВН имеют номинальное напряжение 330–750 кВ и выполняются преимущественно воздушными.

Потери активной мощности в них состоят из нагрузочных  $\Delta P_{\text{н}}$  и потерь на корону  $\Delta P_{\text{к}}$ :

$$\Delta P = \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{к}}. \quad (1.1)$$

Нагрузочные потери можно оценить по формуле

$$\Delta P_{\text{н}} = \frac{S^2}{U^2} R_{\text{л}}. \quad (1.2)$$

Передаваемая по линии мощность  $S$  может быть выражена в долях  $\alpha$  от натуральной мощности  $P_{\text{нат}}$ :

$$S = \alpha P_{\text{нат}}.$$

При этом натуральная мощность определяется выражением

$$P_{\text{нат}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{\sqrt{x_0/b_0}}.$$

Потери мощности на корону можно определить по формуле

$$\Delta P_{\text{к}} = \Delta p_{\text{у.к}} l k_U, \quad (1.3)$$

где  $\Delta p_{\text{у.к}}$  – удельные потери при номинальном напряжении, зависящие от вида погоды [3, табл. 3.10];  $k_U$  – коэффициент, учитывающий влияние напряжения на  $\Delta p_{\text{у.к}}$ , если фактическое напряжение в линии отличается от номинального.

$$k_U = 6,88 \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 - 5,88 \frac{U}{U_{\text{НОМ}}}.$$

### Программа работы

Для заданного преподавателем варианта линии СВН, нагрузки и вида погоды найти оптимальное напряжение по критерию минимума суммарных  $\Delta P$  из следующего ряда значений напряжений:

- для  $U_{\text{НОМ}} = 330$  кВ – 300; 315; 330; 345; 360 кВ;
- для  $U_{\text{НОМ}} = 750$  кВ – 720; 735; 750; 765; 780 кВ.

*Пример исходных данных:*

- $U_{\text{НОМ}} = 330$  кВ;
- $2 \times \text{АС-300/39}$ ;
- $L = 180$  км;
- $\alpha = 0,2$  и  $0,4$ ;
- хорошая погода и дождь.

### Контрольные вопросы

1. Свойства режима натуральной мощности.
2. От каких факторов зависят потери мощности на корону?
3. Виды погоды для оценки потерь мощности на корону.
4. Как влияет на реактивную мощность в линии режим, когда по ней передается мощность меньше  $P_{\text{нат}}$ ?

## Лабораторная работа № 2

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕЙ СЕТИ

**Цель работы:** приобрести навыки по использованию возможностей средств регулирования реактивной мощности для управления режимом в системообразующей сети с целью снижения потерь активной мощности.

### Теоретические сведения

К средствам генерации и регулирования реактивной мощности, которые существенно могут повлиять на режим реактивной мощности в системообразующей сети, можно отнести:

- генераторы крупных электростанций;
- шунтирующие реакторы;
- линии электропередачи.

Генераторы БелАЭС, которые должны постоянно работать в режиме выдачи активной мощности близкой к  $P_{ном}$ , с точки зрения регулирования реактивной мощности будут работать по линии 23 [2, рис. 13.12]. При этом выдаваемая ими реактивная мощность равна нулю в точке 2 и увеличивается до точки 3, соответствующей работе генератора в номинальном режиме. При некотором небольшом снижении выдаваемой активной мощности генераторы БелАЭС могут дополнительно увеличить выдаваемую реактивную мощность (линия 34).

Электростанции типа ГРЭС и ТЭЦ, работающие на газе, являются более маневренными как по активной, так и по реактивной мощности. Их работа возможна по всем линиям характеристики регулирования реактивной мощности [2, рис. 13.12]. Следует отметить, что работа генераторов по линиям 2–1–6 нежелательна и допускается в исключительных случаях.

Линии электропередачи в зависимости от передаваемой мощности могут быть как источниками, так и потребителями реактивной мощности. Их режим зависит от соотношения зарядной мощности  $Q_b$  и потерь реактивной мощности  $\Delta Q_{л}$ . Чаще всего линии электропередачи в системообразующих сетях работают в режиме передаваемой

мощности меньшей натуральной и поэтому являются результирующим источником реактивной мощности. Подробно вопросы регулирования реактивной мощности линиями электропередачи рассмотрены в [2, с. 578–580].

Шунтирующие реакторы могут только потреблять из сети реактивную мощность. Их устанавливают в сетях 330 кВ и выше. Они выпускаются управляемыми и неуправляемыми по реактивной мощности. Подробно вопросы регулирования реактивной мощности шунтирующих реакторов рассмотрены в [2, с. 587–589].

### **Программа работы**

Для заданной схемы системообразующей сети, параметров ее элементов и режимных параметров необходимо вручную и по программному комплексу RastrWin рассчитать следующие режимные параметры, подлежащие анализу:

- потоки реактивной мощности на участках сети;
- напряжения в узлах;
- потери активной мощности в каждом элементе и в сети в целом.

Исходя из имеющихся средств регулирования реактивной мощности и их возможностей, рассмотреть различные варианты применения средств регулирования  $Q$  для максимально возможного снижения суммарных потерь активной мощности в сети.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие допустимые повышения напряжения сверх номинального в сетях 330 и 750 кВ?
2. От каких факторов зависят потери активной мощности в линиях СВН?
3. На что надо воздействовать, чтобы изменить реактивную мощность генератора?
4. Каков возможный диапазон реактивной мощности генераторов БелАЭС?
5. Назовите примеры подстанций сети Белэнерго, где установлены шунтирующие реакторы.
6. В каких режимах работы линий электропередачи целесообразно применение шунтирующих реакторов?

## Лабораторная работа № 3

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССОГЛАСОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕЙ СЕТИ

**Цель работы:** оценка влияния рассогласования коэффициентов трансформации трансформаторов на уровни напряжения, режим реактивной мощности и потери активной мощности в системообразующей сети.

### Теоретические сведения

При включении на параллельную работу трансформаторов с разными коэффициентами трансформации напряжения на их вторичных обмотках будут различными  $U_1^B$  и  $U_2^B$ . Разность вторичных напряжений вызывает прохождение через трансформаторы уравнивающей мощности:

$$\underline{S}_{ур} = \frac{U_1^B - U_2^B}{Z_{т\Sigma}} U_{ном},$$

где  $Z_{т\Sigma}$  – суммарное сопротивление обмоток трансформаторов, включенных в замкнутый контур.

При протекании уравнивающей мощности по сопротивлениям обмоток замкнутого контура в них теряется активная и реактивная мощность. Так как  $X_{т\Sigma} \gg R_{т\Sigma}$ , то трансформаторы в данном режиме потребляют значительную реактивную мощность и небольшую активную. Таким образом, параллельно работающие трансформаторы с рассогласованными коэффициентами трансформации могут рассматриваться как устройства, потребляющие из сети избытки реактивной мощности, т. е. выполняют функцию, например, шунтирующего реактора.

Изменение суммарного коэффициента рассогласования трансформаторов в итоге приводит к изменению распределения мощностей в линиях, примыкающих к данному узлу, а значит потерь мощности в них и напряжения в узлах.

## Программа работы

Возможный вариант предлагаемой преподавателем схемы сети и исходных данных приведен на рис. 3.1.

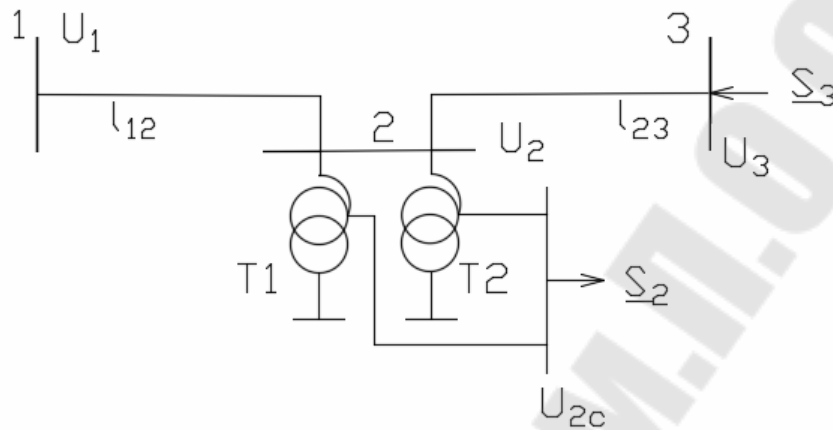


Рис. 3.1. Схема сети к лабораторной работе № 3

Заданы следующие исходные данные:

- марки проводов и длины линий 12 и 23;
- марки трансформаторов и характеристики устройств РПН ( $\pm n \times \delta U_{\text{ст}} \%$ );
- характеристики узлов нагрузок:  $U_1$ ;  $\underline{S}_2$ ;  $\underline{S}_3$ ;
- вид погоды.

Вручную и используя программный комплекс RastrWin, выполнить электрический расчет сети для следующих случаев:

- коэффициенты трансформации обмоток ВН и СН трансформаторов одинаковы  $k_{\text{T1}} = k_{\text{T2}} = k_{\text{ТНОМ}} = \frac{U_{\text{В.НОМ}}}{U_{\text{С.НОМ}}}$ ;

- коэффициенты трансформации разные (два случая).

При выполнении ручного расчета сделать не менее двух итераций.

Результатами расчета, подлежащими анализу, должны быть:

- потоки реактивной мощности на участках сети;
- потери активной мощности в линиях, включающие нагрузочные потери и на корону;
- нагрузочные потери активной мощности в трансформаторах;
- суммарные потери активной мощности;
- напряжение в узлах  $U_2$ ;  $U_3$ ;  $U_{2c}$ .



Сделать сравнительный анализ полученных результатов. Оценить целесообразность, эффективность и техническую допустимость режимов рассогласования коэффициентов трансформации.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие недостатки присущи параллельной работе трансформаторов?
2. Какие отрицательные последствия параллельной работы трансформаторов с разными коэффициентами трансформации?
3. От чего зависит уравнивающий ток, протекающий по обмоткам трансформатора, при разных коэффициентах трансформации?
4. С какими положительными последствиями для сети связан режим параллельной работы трансформаторов с разными коэффициентами трансформации?

## Лабораторная работа № 4

### ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПИТАЮЩИХ ЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

**Цель работы:** приобретение навыков по применению методов и средств для приведения естественного распределения мощностей в замкнутых сетях к экономичному.

#### Теоретические сведения

Основные соотношения, характеризующие распределение мощностей в замкнутом контуре, приведены в [2, § 14.3]. При этом естественное распределение мощностей для замкнутой сети [2, рис. 14.8] определяется формулой (14.11) и зависит от полных мощностей узлов нагрузки и полных сопротивлений участков замкнутого контура. Экономичным распределением мощностей является такое, которое соответствует минимуму потерь активной мощности в замкнутом контуре. Оно определяется для той же замкнутой сети [2, рис. 14.8] формулой (14.14), т. е. зависит от полных мощностей узлов нагрузки и только от активных сопротивлений участков замкнутого контура. Заметим, что в однородной замкнутой сети естественное распределение мощностей совпадает с экономичным, а в неоднородной не совпадает.

Принципы приведения распределения мощностей в неоднородных замкнутых сетях к экономичному рассмотрены в [2, § 14.4].

#### Программа работы

Для заданной преподавателем схемы замкнутой сети и ее параметров найти естественное и экономичное распределение мощностей.

Для каждого режима распределения мощностей рассчитать потери активной мощности, сделать сравнительный анализ результатов.

Наметить пути приведения распределения мощностей к экономичному.

#### Контрольные вопросы

1. Какая замкнутая сеть называется однородной или неоднородной?

2. Почему в неоднородной сети естественное распределение мощностей не совпадает с экономичным?
3. Что понимается под экономичным распределением мощностей?
4. Назовите пути приведения неоднородной сети к однородной.

## Лабораторная работа № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Цель работы:** определение оптимальной загрузки трансформаторов распределительных сетей по критериям минимума суммарных потерь активной мощности и потерь электроэнергии.

#### Теоретические сведения

Под оптимальной понимается величина, соответствующая принятому критерию оптимальности. В данной работе оптимальный уровень загрузки трансформаторов определим по критериям минимума суммарных потерь активной мощности  $k_{\Delta P}$  и суммарных потерь электроэнергии  $k_{\Delta W}$ .

Суммарные потери активной мощности в двухобмоточном трансформаторе  $\Delta P_T$  состоят из потерь холостого хода и нагрузочных потерь  $\Delta P_{x.T}$ , которые можно рассчитать по формуле

$$\Delta P_T = \Delta P_{x.T} + \Delta P_{н.т} = \Delta P_x + \Delta P_k \left( \frac{S}{S_{ном}} \right)^2. \quad (5.1)$$

Отношение мощности нагрузки  $S$  к номинальной мощности трансформатора  $S_{ном}$  называется коэффициентом загрузки трансформатора  $k_z$ .

В [1] получено, что в соответствии с формулой (5.1) оптимальный уровень загрузки трансформатора по критерию минимума суммарных потерь активной мощности  $k_{\Delta P}$  определяется по формуле

$$k_{\Delta P} = \sqrt{\frac{\Delta P_x}{\Delta P_k}}. \quad (5.2)$$

По методу времени максимальных потерь  $\tau$  суммарные потери электроэнергии в трансформаторе определяются следующей формулой:

$$\Delta W_T = \Delta P_x T + \Delta P_k \left( \frac{S_{н.б}}{S_{ном}} \right)^2 \tau. \quad (5.3)$$

Исходя из нее в [1] получено, что коэффициент оптимальной загрузки трансформатора по критерию минимума суммарных потерь электроэнергии  $k_{\Delta W}$  находится по формуле

$$k_{\Delta W} = \sqrt{\frac{\Delta P_x T}{\Delta P_k \tau}}. \quad (5.4)$$

### Программа работы

Для заданных преподавателем марок трансформаторов разных лет выпуска и исполнений найти коэффициент оптимальной их загрузки по критериям  $k_{\Delta P}$  и  $k_{\Delta W}$ .

Сделать анализ полученных результатов и оценку на предмет экономической целесообразности и технической допустимости таких нагрузок трансформаторов.

Оценить потери активной мощности и электроэнергии в трансформаторах при оптимальной и технически допустимой нагрузке.

#### *Пример исходных данных:*

- для определения  $k_{\Delta P}$  ТМ-63/10;  $\Delta P_x = 265$  Вт;  $\Delta P_k = 1470$  Вт;
- для определения  $k_{\Delta W}$  дополнительно значения времени использования наибольшей нагрузки  $T_{нб} = 2500; 3000$  ч.

### Контрольные вопросы

1. По каким критериям можно оценить оптимальную нагрузку трансформаторов?
2. Формулы определения коэффициентов оптимальной загрузки трансформаторов по разным критериям.
3. Какой из коэффициентов оптимальной загрузки трансформаторов больше:  $k_{\Delta P}$  или  $k_{\Delta W}$ ?
4. В трансформаторах старых или новых лет выпуска  $k_{\Delta P}$  больше?

## Лабораторная работа № 6

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКИ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

**Цель работы:** определение оптимальной загрузки электрической сети по критерию минимума суммарных потерь электроэнергии.

#### Теоретические сведения

В качестве примера рассмотрим электрическую сеть, состоящую из последовательно включенных линии и трансформатора. Потери электроэнергии в этой сети на основе метода времени максимальных потерь  $\tau$  рассчитываются по формуле:

$$\Delta W = \Delta W_{x.t} + \Delta W_{н.т} + \Delta W_{н.л} = \Delta P_{x.t} T + \Delta P_k \left( \frac{S_{н.б}}{S_{ном}} \right)^2 \tau + \frac{S_{н.б}^2}{U^2} R_l \tau. \quad (6.1)$$

Оптимальная нагрузка сети, как показано в [1], определяется следующим выражением:

$$k_{\Delta W} = \sqrt{\frac{\Delta P_x T}{\Delta P_k \tau + \frac{S_{ном}^2}{U^2} R_l \tau}}. \quad (6.2)$$

#### Программа работы

Для заданных преподавателем характеристик трансформатора и линии и по их справочным и расчетным параметрам определить оптимальную нагрузку сети по критерию  $k_{\Delta W}$ .

При оптимальной нагрузке сети найти потери электроэнергии и рассчитать структуру потерь в ней.

Оценить соотношение потерь холостого хода в трансформаторе  $\Delta W_{xt}$  с общими нагрузочными потерями в трансформаторе  $\Delta W_{н.т}$  и линии  $\Delta W_{н.л}$ .

*Пример исходных данных:*

- трансформатор ТМ-100/10;
- линия АС-50/8;  $L = 6$  км;
- нагрузка  $T_{нб} = 2500; 3000$  ч.

### **Контрольные вопросы**

1. При всех равных условиях коэффициент  $k_{\Delta W}$  больше для трансформатора или для сети?
2. Как влияет  $T_{нб}$  на коэффициент  $k_{\Delta W}$  сети?
3. При всех других равных условиях коэффициент  $k_{\Delta W}$  меньше в линии с проводом АС-70/11 или АС-95/16?

## Литература

1. Федин, В. Т. Основы проектирования энергосистем : учеб. пособие : в 2 ч. / В. Т. Федин, М. И. Фурсанов. – Минск : БНТУ, 2010. – Ч. 1. – 322 с.
2. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети : учебник / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев. – Минск : Технопринт, 2004. – 720 с.
3. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2009. – 392 с.



## Содержание

Лабораторная работа № 1. Оптимизация режимов линий сверхвысокого напряжения по критерию минимума суммарных потерь активной мощности .....	3
Лабораторная работа № 2. Исследование влияния средств регулирования реактивной мощности на режимные параметры системообразующей сети.....	5
Лабораторная работа № 3. Исследование влияния рассогласования коэффициентов трансформации параллельно работающих трансформаторов на режимные параметры системообразующей сети.....	7
Лабораторная работа № 4. Оптимизация режимов питающих замкнутых электрических сетей.....	10
Лабораторная работа № 5. Определение оптимальной загрузки трансформаторов .....	12
Лабораторная работа № 6. Определение оптимальной загрузки простейшей электрической сети .....	14
Литература .....	16

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Лычев Петр Васильевич**

# **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

**Практикум  
по выполнению лабораторных работ  
для студентов специальности  
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»  
дневной формы обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

*Редактор* Н. В. Гладкова  
*Компьютерная верстка* И. П. Минина

Подписано в печать 30.03.21.  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Ризография. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 0,74.  
Изд. № 25.  
<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель