

Министерство образования Российской Федерации

Томский политехнический университет

УТВЕРЖДАЮ
Директор ЭЛТИ
_____ Суржиков А.П.
«___» _____ 2007 г.

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 140211 –
«Электроснабжение»

Томск 2008

УДК 658.26(076.5)

Качество электроснабжения. Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности 140211 – «Электроснабжение». – Томск: Изд-во ТПУ. – 50 с.

Составитель канд. техн. наук

Волков Н.Г.

Рецензент канд. техн. наук

Стукач В.С.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры Электроснабжения промышленных предприятий ЭЛТИ 31 августа 2007 г. (протокол № 95).

Зав.кафедрой,
проф., докт. техн. наук

Б.В.Лукутин

Одобрено учебно-методической комиссией ЭЛТИ.
Председатель учебно-методической комиссии

В.И.Готман

Лабораторный практикум по курсу «Энергоэффективность преобразования и транспортировки электроэнергии» включает в себя 7 лабораторных работ, объединенных единой целью – эффективной эксплуатацией электрохозяйства промышленных предприятий.

Лаборатория состоит из пяти идентичных лабораторных установок, каждая из которых представляет собой математическую модель типовой системы электроснабжения предприятия. Все лабораторные работы каждая бригада выполняет на одной и той же лабораторной установке, закрепленной на весь цикл работ. Набор тем лабораторных работ и их порядок выполнения предусматривает комплексное изучение режимов работы типовой системы электроснабжения. При этом результаты предыдущих работ используются при проведении последующих.

На каждой лабораторной установке моделируется суточный цикл функционирования системы электроснабжения. Лабораторные установки отличаются между собой только графиками нагрузок, что обеспечивает индивидуальность работы каждой бригады студентов и многообразие результатов. Набор элементов системы электроснабжения, их параметры, а также управление ими изложено в описании лабораторной установки.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка является математической моделью системы электроснабжения промышленного предприятия (СЭПП) и предназначена для учебной работы студентов. На установке моделируется суточный цикл работы типовой СЭПП.

Мнемосхема установки, приведенная на ее лицевой панели, включает следующие элементы типовой СЭПП (рис. 1):

1) главную понизительную подстанцию (ГПП) 110/10 кВ, состоящую из трансформаторов Т1, Т2 номинальной мощностью по 10000 кВ·А и распределительного устройства (РУ) 10 кВ. Имеется возможность ручного или автоматического по времени суток переключения анцапф трансформатора Т2;

2) цеховую трансформаторную подстанцию 10/0,4 кВ, состоящую из трансформаторов Т3 и Т4 номинальной мощностью по 1000 кВ·А. Трансформатор Т4 оснащен устройством переключения отпаек без возбуждения (ПБВ);

3) синхронный двигатель СД типа СДН-10-1250, имеющий руч-

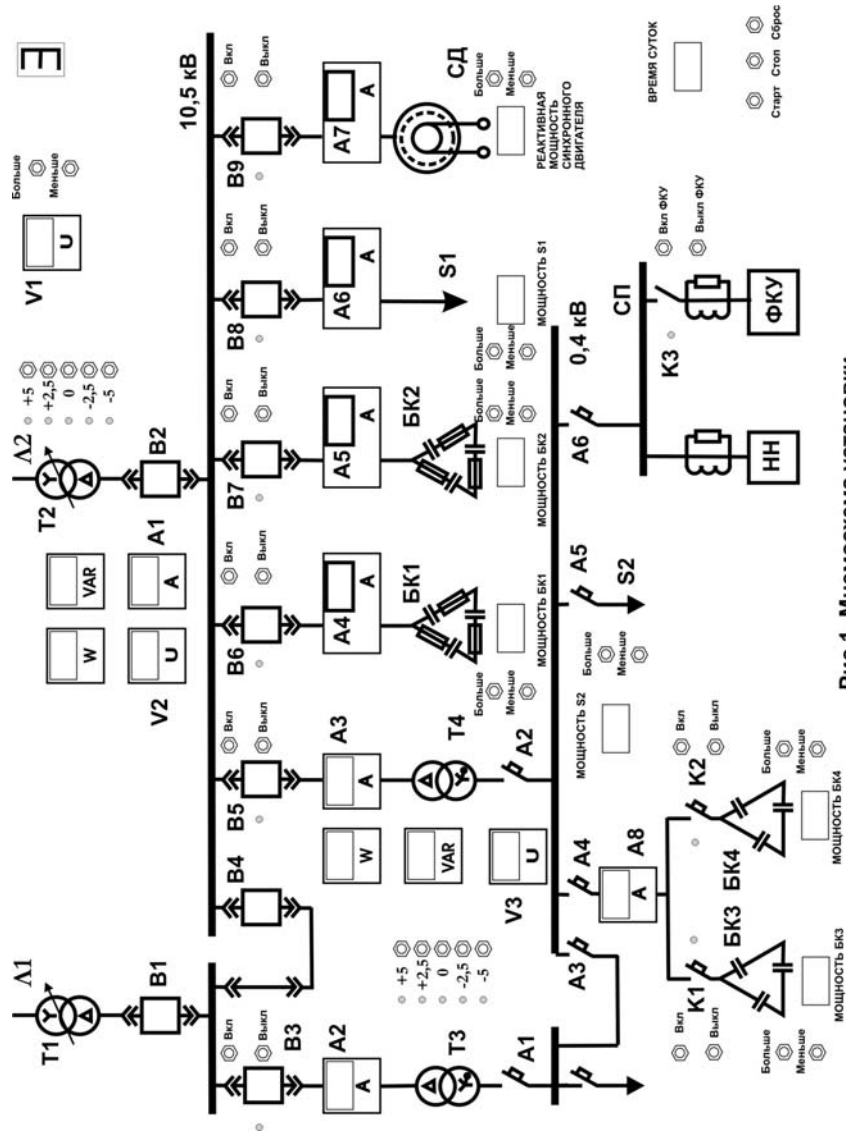


Рис.1. Мнемосхема установки

ную регулировку возбуждения;

4) батареи силовых конденсаторов на номинальное напряжение 10,5 кВ (БК1 и БК2) и на напряжение 0,4 кВ (БК3 и БК4). Имеется возможность ручного или автоматического по времени суток включения и отключения батарей. Мощность батареи задается нажатием кнопок «больше», «меньше», расположенных около их мнемосимволов на схеме;

5) силовой пункт СП в цеховой сети 380/220 В, к которому подключена нелинейная нагрузка НН, вызывающая появление на шинах СП высших гармоник напряжения;

6) фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ, предназначенное для уменьшения уровня высших гармоник напряжения на шинах СП.

На мнемосхеме размещены следующие измерительные приборы:

*I*1 – щитовой киловольтметр для измерения напряжения с высокой стороны трансформатора ГПП Т2 (на линии раздела балансовой принадлежности сетей) ;

*I*2 – киловольтметр для контроля напряжения на шинах РУ
10 кВ;

*I*3 – вольтметр для контроля напряжения на шинах РУ
380/220 В цеховой ТП;

*A*1-*A*8 – щитовые амперметры, служащие для контроля токов в моделируемой сети. Параметры моделируемых элементов приведены в табл.1.

График нагрузки *S*2 цеховой ТП моделируется близким к реальному. Он программно задан и всегда один и тот же для конкретной бригады студентов.

Остальные (по отношению к приведенной на мнемосхеме цеховой ТП) потребители 10 кВ ГПП представлены обобщенной нагрузкой *S*1, график которой так же задается программой. Нагрузка синхронного двигателя, подключенного к шинам 10 кВ ГПП, неизменна во времени.

В моделируемой сети 0,4/0,23 кВ представлен на мнемосхеме один из силовых пунктов СП с нелинейной нагрузкой (однофазный выпрямитель) которая обуславливает наличие в напряжении на шинах СП высших гармоник напряжения. Для компенсации этих гармоник установлено фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ, подключение и отключение которого производится кнопками, расположенными на лицевой панели. Форму тока и напряжения можно изучить по изображению на мониторе.

Все органы управления установкой расположены на лицевой панели. В нижнем левом углу панели установлен автомат включения

питания установки.

Т а б л и ц а 1

Параметры элементов системы электроснабжения, моделируемой на лабораторной установке

Обозначение на мненос-хеме (рис.1)	Тип	Номинальное напряжение, кВ	Параметры
Т1, Т2	ТДН 1000/110	115/11	$S_H = 10000$ кВА, $\Delta P_{xx} = 27$ кВт, $\Delta P_{кз} = 74$ кВт, $U_K = 10,5\%$, $I_{xx} = 0,9\%$, ступени РПН: +5,0%, +2,5%, 0, -2,5%. -5%
Т3, Т4	ТМЗ 1000/10	10/0,4	$S_H = 1000$ кВА, $\Delta P_{xx} = 2,4$ кВт, $\Delta P_{кз} = 12,2$ кВт, $U_K = 5,5\%$, $I_{xx} = 2\%$, ступени ПБВ: +5 %, +2,5%, 0, -2,5%. -5%
БК1, БК2		10,5	$Q_H = 8 \times 105 = 840$ кВАр (каждая батарея имеет 8 ступеней по 105 кВАр), $\Delta P_o = 0,0025$ кВт/кВАр
БК3, БК4	УКЛ-0,38	0,4	$Q_H = 3 \times 105 = 315$ кВАр, $\Delta P_o = 0,0045$ кВт/кВАр
Кабель питающий Т4	АСБ 10(3x50)	10	$I_{дд} = 140$ А, $R_o = 0,62$ Ом/км, $X_o = 0,04$ Ом/км, $L = 1$ км
СД	СДН-10-1250	10	$P_H = 1250$ кВт, $\cos \varphi_H = 0,9$, $K_3 = 0,8$, $D_1 = 6,77$ кВт, $D_2 = 6,98$ кВт
ФКУ		0,4	

У изображения коммутационных аппаратов установлены кнопки включения и отключения этих аппаратов. Сигнальные лампы показывают состояние коммутационного аппарата. Измерительные приборы, размещенные на лицевой панели, служат для измерения токов в линиях и напряжений на шинах 10,5 кВ и 0,4 кВ. Активная и реактивная мощность в цепях Т2 и Т4 измеряются датчиками уста-

новленными внутри стенда. Рядом с мнемосимволами трансформаторов Т2 и Т4 расположены кнопки переключения анцапф трансформатора и сигнальные лампы.

Кнопки «Мощность БК» и кнопки «Реактивная мощность СД» предназначены для задания величины генерируемой реактивной мощности конденсаторных батарей и синхронного двигателя соответственно (мощность указана в кВАр). На правой нижней части лицевой панели расположены органы управления режимами работы всей установки: кнопка «Пуск» - для запуска установки в работу; кнопка «Сброс» - для возврата установки в исходное состояние; кнопка «Остановка» - фиксирования какого-либо режима установки; цифровое табло для контроля модельного времени суток. В лабораторной установке возможно автоматическое по времени суток переключение анцапф трансформатора Т2, а также включение и отключение трансформатора Т3 и конденсаторных батарей БК1, БК2, БК3 и БК4.

Лабораторная установка имеет два режима работы:

1. При включении питания - режим подготовки (исходный режим). В этом режиме задаются начальные условия (включение и отключение соответствующих элементов системы); устанавливается программа работы по времени суток устройства РПН трансформатора Т2, трансформатора Т3, конденсаторных батарей БК1, БК2, БК3 и БК4. Подключаются и настраиваются необходимые измерительные приборы, а также проверяется готовность установки к "прогонке" суточного цикла.

2. При нажатии кнопки «Пуск» включается процесс моделирования нагрузок суточного цикла. Загорается цифра 01 на цифровом табло, и происходит подача питания на моделируемую схему, которая до этого была обесточена.

Суточный цикл работы системы электроснабжения моделируется за 12 мин. (1 ч реальной системы за 30 с установки). Модельное время суток в час показывается на цифровом табло).

По окончании суточного цикла установка автоматически возвращается в исходный режим. При необходимости установку можно вернуть в исходный режим принудительно нажатием кнопки «Сброс». Кнопкой «Остановка» останавливается программа моделирования суточного цикла. При этом останавливается отсчет времени и прекращается учет электропотребления. Программа может быть продолжена нажатием кнопки «Пуск».

Шкалы всех амперметров и вольтметров на лицевой панели стенда проградуированы в действительных величинах. Эти приборы

используются для визуального контроля параметров режима работы моделируемой системы.

При выполнении ряда измерений используется дополнительная аппаратура (осциллограф, измеритель нелинейных искажений и др.). Устройство и работа этой аппаратуры изучаются в соответствующих лабораторных работах.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МОДЕЛИРУЕМОЙ СЭПП

1. Цель работы

Изучение конструкции лабораторной установки, принципа ее работы и параметров моделируемых элементов СЭПП.

Исследование режима работы моделируемой СЭПП на суточном интервале времени и определение параметров режимов.

2. Введение

Основные номинальные параметры моделируемых элементов СЭПП приведены в табл. 1. Для трехфазных силовых трансформаторов в практических расчетах используются следующие параметры при замещении трансформатора Г-образной однолинейной эквивалентной схемой:

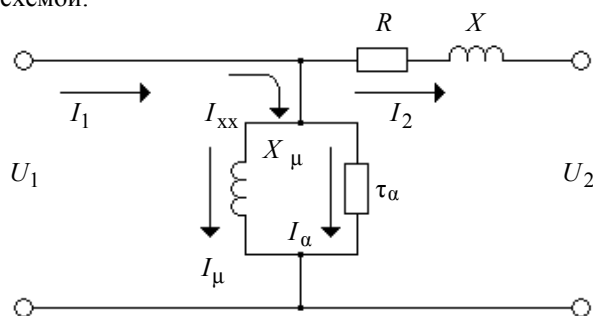


Рис. 2. Г – образная эквивалентная схема замещения трёхфазного трансформатора

U_1, U_2 – линейные или фазные напряжения, приведенные к одной ступени напряжения;

I_1, I_2 – токи первичной и вторичной обмоток трансформатора;

$I_{xx} = I_a - jI_p$ – ток холостого хода трансформатора;

$X_\mu = \frac{\sqrt{3}U_1^2}{\Delta Q_{xx}}$ – индуктивная составляющая сопротивления ветви

намагничивания (U_1 – линейное напряжение);

$r_a = \frac{\sqrt{3}U_1^2}{\Delta P_{xx}}$ – активная составляющая сопротивления ветви на-

магничивания;

$R = \frac{\Delta P_{кз}}{3I_H^2} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_H^2}{S_H^2}$ – активное сопротивление трансформато-

ра;

$x = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_k \cdot U_H}{100}\right)^2 - (I_H R)^2}}{\sqrt{3}I_H}$ – индуктивное сопротивление транс-

форматора;

$\Delta \dot{S} = 3I_2^2 R - j3I_2^2 x = \Delta P_{кз} \cdot K_3^2 - j\Delta Q_{кз} \cdot K_3^2$ – нагрузочные потери

в трансформаторе ($K_3 = \frac{I_2}{I_H}$ – коэффициент загрузки);

$\Delta \dot{U} = I_2 R + jI_2 x$ – потери напряжения в трансформаторе.

Основной особенностью режимов работы СЭПП на длительных циклах времени (сутки, неделя, год) является их изменчивость, что обусловлено изменчивостью электрических нагрузок. Режимы СЭПП характеризуются параметрами двух видов: текущие и интегральные за время T . К текущим параметрам относятся значения токов, напряжений, мощностей в узлах сети, изменяющиеся во времени. К интегральным за время T – средние значения токов, напряжений, мощностей, их дисперсии, потери электроэнергии и др.

На суточных интервалах времени текущие значения параметров режимов СЭПП принято представлять в форме суточных графиков (тока, напряжения, мощности и др.) их осредненных значений на последовательных интервалах Θ ($\Theta = 30$ или 60 мин.).

Интегральные параметры, например, для графика тока

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i; \quad \sigma_I^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - I_{\text{cp}})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2 - I_{\text{cp}}^2 = I_3^2 - I_{\text{cp}}^2,$$

где n – число интервалов Θ в суточном графике тока; I_3 – среднеквадратичное значение графика тока.

Потери электроэнергии в линии с сопротивлением R за время T :

$$\Delta W = 3I_{\text{cp}}^2 RT + 3\sigma_I^2 RT = \Theta \sum_1^n 3I_i^2 R.$$

Потери электроэнергии в трансформаторе за время T :

$$\Delta W = \Delta P_{\text{xx}} T + \left(\frac{I_{\text{cp}}}{I_{\text{H}}} \right)^2 \Delta P_{\text{кз}} T + \frac{\sigma_I^2}{I_{\text{H}}^2} \Delta P_{\text{кз}} T = \Delta P_{\text{xx}} T + \Theta \sum_1^n \left(\frac{I_i}{I_{\text{H}}} \right)^2 \Delta P_{\text{кз}}.$$

3. Порядок выполнения работы (задание)

3.1. Изучить конструкцию лабораторной установки. Рассчитать все сопротивления эквивалентной схемы для трансформаторов Т2 и Т4

3.2. Подготовиться к регистрации графиков активных и реактивных нагрузок – заготовить таблицу 2 в двух экземплярах (для трансформаторов Т2 и Т4 отдельно).

3.3. Подготовить установку для регистрации текущих параметров режима работы моделируемой СЭПП на суточном интервале времени: включить питание стенда; включить трансформатор Т4, обобщенную нагрузку S_1 на шинах 10,5 кВ ГПП, синхронный электродвигатель; отключить трансформатор Т3, конденсаторные батареи БК1, БК2, БК3 и БК4, а также силовой фильтр ФКУ; установить РПН трансформатора Т2 и ПБВ трансформатора Т4 в нулевое положение.

3.4. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и произвести регистрацию графиков активной и реактивной мощностей нагрузок трансформаторов Т2 и Т4 путем считывания и записи в табл.2 (графы 2, 3) показаний соответствующих приборов. По показаниям амперметров записать значения тока нагрузки трансформаторов Т2 и Т4 (графа 4).

3.5. Произвести расчет графиков полной мощности. Рассчитать средние значения и среднеквадратические отклонения графиков нагрузки. Для самоконтроля рекомендуется сопоставить полученные значения тока со значениями, рассчитанными по полной мощности.

3.6. Рассчитать потери электроэнергии за сутки в трансформа-

торах Т2, Т4 и в кабельной линии (в киловатт-часах и в процентах). В величине потерь выделить составляющую, обусловленную неравномерностью графиков нагрузок.

3.7. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- мнемосхему установки, краткое описание и параметры моделируемых элементов типовой СЭПП, цель работы;
- расчет сопротивлений эквивалентной схемы;
- результаты регистрации и расчета графиков нагрузки и их параметров для трансформаторов Т2 и Т4 (табл. 2);
- графики нагрузок Т2 и Т4 (активной, реактивной, полной мощности и тока);
- расчет потерь электроэнергии в трансформаторах Т2, Т4 и в кабельной линии, питающей трансформатор Т4;
- выводы по полученным результатам работы и ответа на контрольные вопросы.

Т а б л и ц а 2

Текущие и расчетные параметры режима СЭПП
на суточном интервале времени для трансформатора Т2 (Т4)

Номер часа суток	Графики нагрузок			Расчетные данные			
	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, кВАр	Текущий ток, А	Полная мощность, кВА	Расчетный ток, А	tg φ	cos φ
1	2	3	4	5	6	7	8
1							
2							
3							
⋮							
24							
Среднее значение тока $I_{\text{ср}} =$							
Среднеквадратическое отклонение σ_y							

4. Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка к лабораторной работе должна включать:

- изучение теоретического материала курса ЭСПП по разделу

«Режимы электропотребления промышленных предприятий»;
– выполнение пп.3.1 и 3.2 задания.

5. Контрольные вопросы

1. Каковы причины изменчивости параметров режимов работы СЭПП во времени?
2. Какие потери имеются в трансформаторах и от чего они зависят?
3. Как определяются потери электроэнергии в промышленных электросетях?
4. Неравномерность режимов электропотребления осложняет и ухудшает работу электроэнергетических систем. Почему?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

1. Цель работы

Изучить методику оценки уровней напряжения в сети и способы их улучшения на суточном интервале времени.

2. Введение

Имеются две основные причины, обуславливающие изменчивость напряжения в электрических сетях: изменчивость нагрузок, вызывающая колебание потерь напряжения, и регулирование напряжения с целью поддержания его в заданных пределах.

Уровни напряжения принято оценивать отклонениями напряжения от номинального V , которые также переменные во времени по указанным выше причинам.

Наилучшим напряжением на зажимах электроприемников, с точки зрения технико-экономической эффективности их работы, является $U(t) = U_n = \text{const}$, т.е. $V = 0$. Обеспечить такой режим напряжения для всей массы электроприемников в сети практически невозможно, поэтому всегда $V \neq 0$. Причем чем больше величина V , тем хуже напряжение. Из этого правила имеется ряд исключений, напри-

мер, для слабо загруженного асинхронного электродвигателя наилучшим является напряжение, меньшее номинального. Величина допустимых значений V нормируется ГОСТ [2] в целом для электрических сетей в зависимости от их напряжения. Наиболее жесткие требования в величине V в ГОСТе предъявляются, естественно, к тем сетям, которые питают основную массу электроприемников (сети до 1000 В).

Для сетей напряжением до 1000 В с интегральной вероятностью 0,95 допустимы отклонения напряжения $\pm 5\%$, с вероятностью 0,05 допустимы большие отклонения, но они не должны превышать $\pm 10\%$.

Т а б л и ц а 3

Допустимые значения отклонений напряжения по ГОСТ 13109-97

Напряжение сети	Допустимые значения	
	нормальные	максимальные
до 1 кВ	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
6-20 кВ	-	$\pm 10\%$
35 кВ и выше	-	-

Оценку максимальных отклонений напряжения обычно проводят для режимов максимальных и минимальных нагрузок с помощью построения диаграммы отклонений напряжения в сети.

Для моделируемой сети расчетная схема и диаграмма V показана на рис.3. На этом рисунке:

$V_{цп}$ – отклонение напряжения в центре питания;

ΔU_1 – потеря напряжения в воздушной линии 110 кВ, питающей трансформатор ГПП;

V_0 – отклонение напряжения на линии раздели балансовой принадлежности сетей энергоснабжающей организации и сетей потребителя электроэнергии;

V_1 – отклонение напряжения на шинах РУ 10 кВ ГПП;

ΔU_2 – потеря напряжения в трансформаторе ГПП;

E_1 – добавка напряжения трансформатора ГПП;

ΔU_3 – потеря напряжения в кабельной линии, питающей трансформатор Т4 цеховой ТП;

E_2 – добавка напряжения трансформатора цеховой ТП;

- V_2 – отклонение напряжения на шинах РУ 380/220 В цеховой ТП;
- ΔU_4 – потеря напряжения в цеховом трансформаторе;
- V_3 – отклонение напряжения в сети в точке присоединения наиболее удаленного электроприемника;
- ΔU_5 – потеря напряжения в цеховой сети (например, в шинной магистрали ШМ).

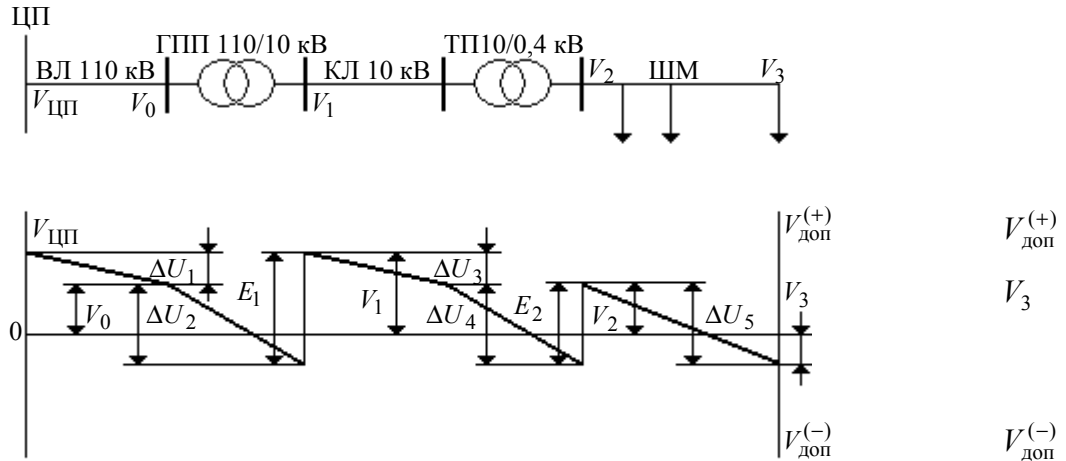


Рис. 3. Расчётная схема и диаграмма отклонений напряжения

В условиях эксплуатации все потребители рассчитывают требуемые значения V_0 для режимов максимальных и минимальных нагрузок с учетом своих средств регулирования напряжения. Если энергоснабжающая организация не выдерживает эти значения, то к ней предъявляются экономические санкции. Поэтому выполнение настоящей лабораторной работы ориентировано на исследование отклонений напряжения в промышленной электросети, проводимое с целью решения данной задачи – расчет требуемых значений V_0 для режимов максимальных и минимальных нагрузок.

Потери напряжения в элементе сети с сопротивлением $Z = R + jx$ и током $\dot{I} = I' - jI''$ определяются по формуле

$$\Delta U = \frac{I' R + I'' x}{U_n}, \quad (1)$$

где I' и I'' – активная и реактивная составляющие тока цепи.

Все необходимые параметры элементов в моделируемой сети приведены в табл.1, а параметры трансформаторов Т2 и Т4 рассчитаны в п.3.1 лабораторной работы № 1.

3. Порядок проведения работы (задание)

3.1. Подготовить установку к работе:

1) включить питание установки и трансформатор Т4, отключить Т3, включить обобщенную нагрузку на шинах 10 кВ S_1 , включить СД, отключить конденсаторные батареи БК1, БК2, БК3, БК4 и фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ;

2) переключатель анцапф трансформатора Т2 и переключатель ПБВ трансформатора Т4 установить в нулевое положение;

3) кнопками задания уровня напряжения в сети 110 кВ установить напряжение, указанное преподавателем.

3.2. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и произвести регистрацию графиков $U(t)$ на шинах 10 кВ ГПП и на шинах 380/220 В цеховой ТП на суточном цикле времени, считывая показания соответствующих вольтметров.

3.3. Обработать результаты измерений:

1) построить графики $V(t)$ для шин 10 кВ ГПП и для 380/220 В цеховой ТП;

2) построить гистограммы отклонений напряжения и вычислить их средние значения и дисперсии.

3.4. Проанализировать полученные результаты, определить оптимальную ступень ПБВ трансформатора Т4 и разработать график переключения анцапф трансформатора Т2. При этом возможность регулирования напряжения с помощью конденсаторных батарей КБ в данной работе не учитывать.

3.5. Установить кнопками, расположенными на лицевой панели, необходимую ступень ПБВ трансформатора Т4 и задать программу переключения анцапф РПН трансформатора Т2.

3.6. Запустить установку и провести регистрацию напряжений на суточном цикле аналогично п.3.2.

3.7. Обработать результаты измерений в соответствии с п.3.3 и оценить соответствие напряжения в моделируемой сети требованиям ГОСТ [2].

3.8. По полученным в пункте 3.7 результатам построить для режимов максимальных и минимальных нагрузок диаграммы отклонений напряжения для моделируемой сети (аналогично рис.3). Отклонения V_1 и V_2 определяются при этом экспериментально, V_0 – расчетным путем по формуле (1). Так как на модели не представлена цеховая сеть 380/220 В (ШМ на рис.3), то потери в этой сети (ΔU_5) рассчитать по данным марки и длины провода до приемника, выданными преподавателем, и оценить V_3 .

3.9. Приняв для шин 380/220 В цеховой ТП допустимые значения отклонений: $V_{\text{доп}}^{(+)} = 5\%$, $V_{\text{доп}}^{(-)} = 0$, определить соответствующие отклонения, которые должна обеспечить энергоснабжающая организация на линии раздела балансовой принадлежности сетей для режимов максимума и минимума нагрузок. Принять время максимума с 8 до 12 часов утра, минимума – с 2 до 5 часов ночи. При этом необходимо принять, что в реальной практике расчета требуемых значений V_0 необходим учет работы компенсирующих устройств, что в настоящей лабораторной работе не производится для упрощения ее выполнения и еще в связи с тем, что вопросы компенсации реактивных нагрузок рассматриваются в следующей лабораторной работе.

3.10. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- формулировку задач исследований;
- результаты оценки отклонений напряжений в моделируемой сети по п.3.3;
- суточный график переключения анцапф трансформатора Т2;
- результаты по п.3.7, полученные после реализации мероприятий;
- напряжения по пп. 3.8 и 3.9;
- выводы по работе с ответами на контрольные вопросы.

4. Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка к работе состоит в следующем:

- 1) повторение теоретического материала [1];
- 2) подготовка к ответам на контрольные вопросы;
- 3) расчет потерь напряжения в трансформаторах Т2 и Т4 для режимов максимальных и минимальных нагрузок, необходимых для выполнения пп. 3.8 и 3.9 задания.

5. Контрольные вопросы

1. Какие допускаются отклонения напряжения в промышленных электросетях по ГОСТ 13109-97 и почему?
2. Как зависит работа различных электроприемников от величины напряжения в сети?
3. Какие способы улучшения напряжения используются в промышленных электросетях и в сетях энергосистем?
4. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений для простейшей сети с сопротивлением $R + jx$ и током $I' - jI''$.
5. Какие имеются оценки уровней напряжения и как они вычисляются?

Лабораторная работа № 3

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНЫХ НАГРУЗОК В СИСТЕМАХ

1. Цель работы

Исследование основных принципов компенсации реактивных нагрузок (КРН) в промышленных электрических сетях (ПЭС). С этой целью в работе предусмотрено: вычисление мощностей компенсирующих устройств (КУ), реализация расчетного режима реактивной мощности на лабораторной модели, оценка влияния КРН на режим напряжения и расчет экономического эффекта.

2. Введение

Обмен реактивной мощностью между системой электроснабжения предприятия и электроэнергетической системой (ЭЭС) регламентирован «Правилами пользования электрической и тепловой энергией». Контроль соблюдения этих правил возложен на предприятие «Госэнергонадзор». Установление конкретных требований к режиму реактивной мощности каждого из предприятий осуществляется при ежегодном заключении договора на потребление электроэнергии. Экономически обоснованные входные реактивные мощности ($Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$) [4] задаются предприятиям дифференцированно, в зависимости от потребляемой мощности и электрической удаленности предприятия от основных источников энергии (электростанций). Числовые значения $Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$ определяются в результате расчетов оптималь-

ных режимов работы энергосистемы в периоды ее максимальных ($Q_{Э1}$) и минимальных ($Q_{Э2}$) нагрузок.

В настоящей лабораторной работе исследуется узел нагрузки, схема замещения которого показана на рис. 4.

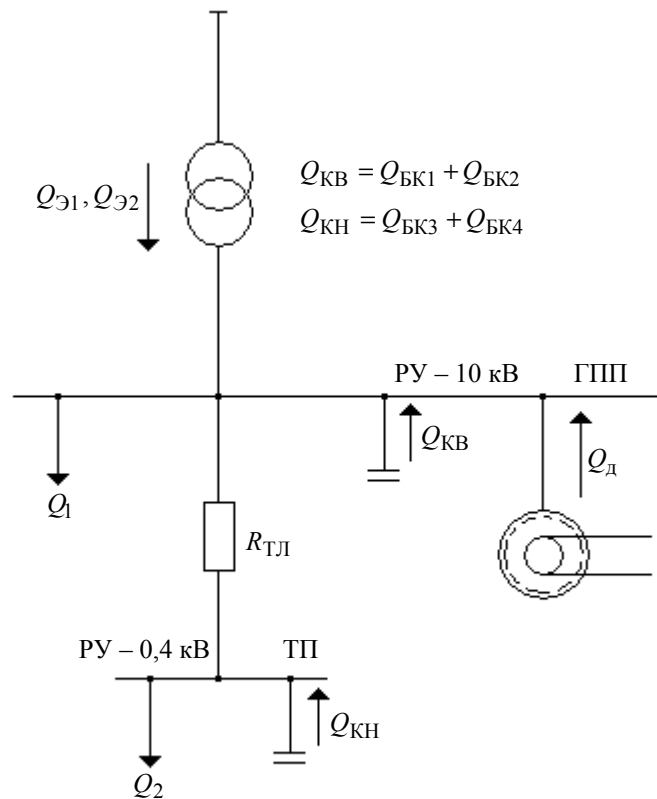


Рис. 4. Схема замещения узла нагрузки

Схема содержит только одну из секций ГПП (правую секцию), поскольку вторая условно считается абсолютно аналогичной. Граница балансовой принадлежности предусмотрена на уровне высоковольтных вводов трансформаторов ГПП. На границе сводятся контрольные балансы активной и реактивной мощностей. Контроль осуществляется на последовательных получасовых интервалах времени при помощи счетчиков энергии с фиксированием максимумов

или при помощи специальных информационно-измерительных систем.

В лабораторной модели источниками реактивной мощности являются: электроэнергетическая система ($Q_{Э1}$, $Q_{Э2}$), синхронный электродвигатель ($Q_{д}$), конденсаторные установки БК1, БК2 напряжением 10 кВ ($Q_{кв}$) и БК3, БК4 напряжением 0,4 кВ ($Q_{кн}$), потребителями – нагрузка на шинах 10,5 кВ (Q_1) и нагрузка ТП (Q_2).

Наилучшим (оптимальным) режимом компенсации реактивных нагрузок будет режим, соответствующий минимальной величине годовых расчетных затрат и удовлетворяющий требованиям электроэнергетической системы [4]. Для нахождения этого режима составляется функция расчетных затрат (целевая функция) и записываются ограничения [4, 5]. Оптимальными считаются такие мощности компенсирующих устройств, при которых целевая функция принимает минимальное значение в области допустимых решений. Область допустимых решений определяется ограничениями, накладываемыми на мощности КУ. Расчет оптимальных мощностей КУ в описанной выше постановке задачи производится с помощью методов математического программирования.

В лабораторной установке моделируется не вся ПЭС, а только ГПП и одна из цеховых подстанций с питающей ее кабельной линией электропередачи. Нагрузка Q_1 представляет собой суммарную реактивную мощность, потребляемую остальными ТП, число и мощность которых не известны. В этих условиях задачу оптимизации размещения КУ можно решать без применения оптимизационных методов, разделив ее на два этапа.

Этап первый. Рассматривается ТП (рис. 5) и определяется $Q_{кн}$.

Для определения $Q_{кн}$ записывается функция годовых расчетных затрат

$$Z = (Q_{кн}) = E \cdot \Delta K_{н} \cdot Q_{кн} + C_o \left[\Delta P_{н} \cdot Q_{кн} + \frac{R_{гл}}{10^3 \cdot U^2} (Q_2^m - Q_{кн})^2 \right], \quad (1)$$

где E – коэффициент отчислений от капиталовложений (нормативные отчисления, отчисления на эксплуатацию и восстановление оборудования). Численное значение E следует принять равным 0,223 о.е.; $\Delta K_{н}$ – удельная стоимость конденсаторных установок низкого напряжения (6 руб/кВАр); C_o – удельная стоимость потерь активной мощности (задается преподавателем в пределах от 40 до 70 руб/кВт); $\Delta P_{н}$ – удельные потери активной мощности в конденсаторных установках

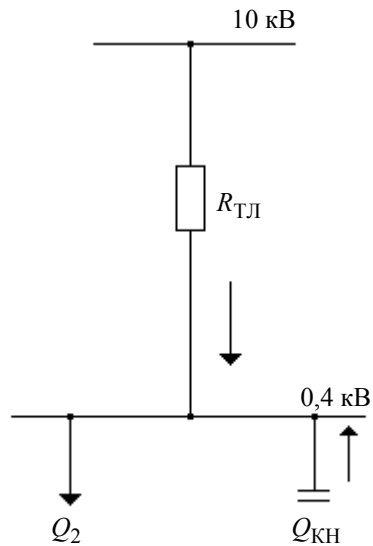


Рис. 5. Расчётная схема замещения для первого этапа расчёта

низкого напряжения (0,003 кВт/кВАр); $R_{ТЛ}$ – приведенное к напряжению 10 кВ сопротивление трансформатора цеховой ТП и питающей его линии электропередачи, Ом. Величина этого сопротивления определяется по данным табл. 1 описания лабораторной установки; U – среднее напряжение на шинах ГПП (10 кВ); Q_2^m – наибольшая реактивная мощность нагрузки трансформатора Т4 в период максимальной активной мощности нагрузки энергосистемы (для упрощения работы считаем, что трансформатор Т3 отключен и в расчетах не учитывается). Определяется по графику нагрузки Т4, полученному в работе № 1. Период максимума задается преподавателем.

$$R_{ТЛ} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U^2}{S_{НТ}^2} 10^3 + r_o \cdot l, \quad (2)$$

где $\Delta P_{кз}$ – потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт (табл. 1); $S_{НТ}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА; r_o – удельное активное сопротивление линии электропередачи, Ом/км; l – длина

линии электропередачи, км.

Мощность конденсаторной батареи определяется из уравнения

$$\frac{dZ}{dQ_{\text{кн}}} = 0. \quad (3)$$

Расчетное выражение имеет вид

$$Q_{\text{кн}} = Q_2^m - \frac{E \cdot \Delta K_{\text{н}} + C_o \cdot \Delta P_{\text{н}}}{2 C_o \cdot R_{\text{ТЛ}}} U^2 \cdot 10^3, \text{ кВАр}. \quad (4)$$

Этап второй. На этом этапе рассматривается задача нахождения оптимальных значений $Q_{\text{кв}}$ и $Q_{\text{д}}$ (рис. 6). Величина нескомпенсированной мощности, передаваемой через трансформатор Т4, показана на схеме как $Q_{\text{Т}}$.

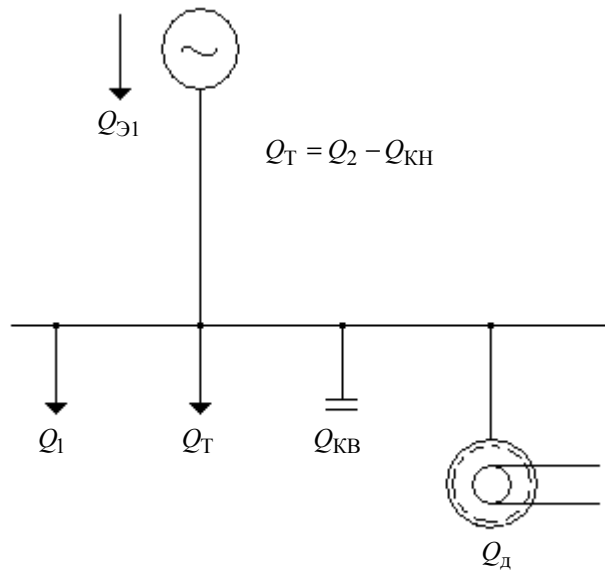


Рис. 6. Расчётная схема замещения для второго этапа расчётов

Функция годовых расчетных затрат для этого этапа расчетов имеет вид

$$3(Q_{\text{кв}}, Q_{\text{д}}) = E \cdot \Delta K_{\text{в}} \cdot Q_{\text{кв}} + C_o (\Delta P_{\text{кв}} \cdot Q_{\text{кв}} + K1 \cdot Q_{\text{д}} + K2 \cdot Q_{\text{д}}^2) \text{ руб/год}, \quad (5)$$

где E, C_o – см. выражение (1); $\Delta K_{\text{в}}$ – удельная стоимость конденсаторных батарей высокого напряжения (5 руб/кВАр); $\Delta P_{\text{в}}$ – удельные потери активной мощности в конденсаторных установках высокого напряжения (0,002 кВт/кВАр); $K1, K2$ – коэффициенты, характеризующие потери активной мощности в СД, зависящие от $Q_{\text{д}}$ ($K1 = 0,011$ кВт/кВАр, $K2 = 0,00019$ кВт/кВАр).

Функция Лагранжа

$$L = (Q_{\text{кв}}, Q_{\text{д}}, \lambda) = 3(Q_{\text{кв}}, Q_{\text{д}}) + \lambda(Q_1^m + Q_{\text{т}} - Q_{\text{эл}} - Q_{\text{кв}} - Q_{\text{д}}), \quad (6)$$

где Q_1^m – реактивная мощность нагрузки на шинах 10 кВ ГПП в период максимальной активной мощности нагрузки ЭЭС.

Мощности $Q_{\text{кв}}$ и $Q_{\text{д}}$ определяются решением системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dQ_{\text{кв}}} &= 0; \\ \frac{dL}{dQ_{\text{д}}} &= 0; \\ \frac{dL}{d\lambda} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) можно получить выражение для расчета $Q_{\text{кв}}$ и $Q_{\text{д}}$ в общем виде

$$Q_{\text{д}} = \frac{1}{K2} \left(\frac{E \cdot \Delta K_{\text{в}}}{C_o} + \Delta P_{\text{кв}} - K1 \right), \text{ кВАр}; \quad (8)$$

$$Q_{\text{кв}} = Q_1^m + Q_{\text{т}} - Q_{\text{эл}} - Q_{\text{д}}, \text{ кВАр}. \quad (9)$$

С помощью (4), (8), (9) вычисляются необходимые установленные мощности конденсаторных батарей и наибольшая реактивная мощность СД. Отрицательные значения расчетных мощностей свиде-

тельствуют об отсутствии экономической целесообразности использования соответствующего источника реактивной мощности. Его значение принимается равным нулю. Величина Q_d не должна превышать допустимых значений по условиям нагрева статора и ротора СД с учетом его загрузки по активной мощности. Проверка СД по условиям нагрева в лабораторной работе не предусмотрена.

Полное использование всех КУ экономически обосновано только в период максимальной нагрузки ЭЭС. При существенно изменяющемся графике реактивной мощности нагрузки требуется регулирование КУ. В лабораторной установке предусмотрено ручное дискретное регулирование Q_d и автоматическое регулирование конденсаторных батарей. Графики регулирования КУ строятся на основании оптимизационных расчетов с учетом требований ЭЭС

($Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$). Регулирование КУ должно обеспечить минимальные потери электроэнергии и требуемый уровень качества напряжения.

Для отдельного узла нагрузки, который исследуется в данной работе, оптимизация не требуется. Графики регулирования КУ в этом случае могут быть построены без расчетов. Основой для их построения являются графики реактивной нагрузки на шинах 10 кВ и 0,4 кВ. При построении графиков регулирования следует учесть:

1. В период максимальной активной мощности нагрузки ЭЭС потребление реактивной мощности не должно превосходить величину $Q_{Э1}$.

2. В период минимальной нагрузки потребляемая реактивная мощность должна быть не меньшей, чем $Q_{Э2}$.

3. Порядок выполнения работы (задание)

3.1. Получить у преподавателя следующую исходную информацию:

а) $Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$;

б) интервалы времени, соответствующие периодам максимума и минимума активной мощности нагрузки ЭЭС;

в) удельную стоимость потерь активной мощности C_o .

3.2. По формулам (4), (8), (9) определить мощности КУ (два этапа). Полученные значения округлить до ближайших возможных величин, указанных в табл. 1 описания лабораторной установки. Мощность нагрузки взять по графику, полученному в лабораторной работе № I, прочую необходимую информацию следует взять из табл. 1.

3.3. Проверить баланс реактивной мощности на шинах ГПП в

часы максимума активной нагрузки ЭЭС. В случае необходимости выполнить корректировку мощностей КУ с целью обеспечения баланса.

3.4. Построить графики регулирования мощностей конденсаторных батарей ($Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$) и синхронного двигателя ($Q_{Д}$). При построении графиков рекомендуется обратить внимание на технико-экономические характеристики и эффективность располагаемых КУ.

3.5. Проверить баланс реактивной мощности на шинах ГПП в часы минимума активной нагрузки ЭЭС.

3.6. Задать схему автоматического управления анцапфами Т2 (работа № 2) и мощностями конденсаторных батарей в соответствии с построенными графиками их регулирования. Привести лабораторную модель в исходное рабочее состояние (включить S1, Т4, СД, отключить ТЗ, БК1, БК2, БК3, БК4).

3.7. Включить лабораторный стенд и выполнить следующее:

а) по показаниям приборов записать графики изменения активной и реактивной мощностей нагрузок трансформаторов Т2 и Т4 с учетом расчетных мощностей КУ и их регулирования.

б) записать по показаниям вольтметров напряжения на шинах 10 кВ ГПП и 0,4 кВ ТП с учетом реализации мероприятий по их улучшению (см. работу № 2.).

Запись графиков нагрузок и напряжений (п. «а» и «б») необходимо производить одновременно.

3.8. Построить графики нагрузки (P и Q) с учетом КУ и сравнить их с графиками, полученными в работе № 1.

3.9. Построить гистограммы, вычислить математические ожидания и дисперсии напряжений на шинах 10 и 0,4 кВ с учетом КРН. Оценить влияние КУ на режим напряжения, сравнив полученные результаты с соответствующими данными работы № 2.

3.10. Оценить экономический эффект КРН на суточном интервале времени в киловатт-часах сэкономленной электроэнергии. Оценку эффекта выполнить сравнением потерь энергии в трансформаторах Т2, Т4 и кабельной линии, вычисленных в работе № 1 по графикам нагрузки, не учитывающим КУ, и потерь в тех же элементах, но с учетом КУ и их регулирования.

3.11. Оформить отчет о лабораторной работе, который должен содержать:

а) таблицу исходных данных для выполнения работы, включая параметры, полученные у преподавателя;

б) расчет мощностей КУ,

в) графики регулирования КУ,

- г) графики активной и реактивной мощностей нагрузки Т2 и Т4 с учетом КУ,
- д) графики изменения напряжений на шинах 10 кВ ГПП и 0,4 кВ ТП,
- е) гистограммы напряжений на шинах 10 кВ ГПП и 0,4 кВ ТП;
- ж) расчет экономического эффекта;
- з) выводы по результатам работы и ответы на контрольные вопросы.

4. Подготовка к работе

В процессе подготовки к работе необходимо ознакомиться с ее описанием, изучить рекомендованную литературу и соответствующие разделы конспекта лекций. Заготовить бланки для записи показаний приборов и продумать ответы на контрольные вопросы.

5. Контрольные вопросы

1. Дать понятие реактивной мощности, пояснить ее физический смысл и особенности в сравнении с активной.
2. Чем определяются предельные значения реактивной мощности, которую может выдать в сеть синхронная машина?
3. Дать сравнительную характеристику источников реактивной мощности, используемых в СЭПП.
4. Каким образом реактивная мощность влияет на режим напряжения электрической сети?
5. Требования, предъявляемые ЭЭС к режиму реактивной мощности СЭПП.
6. Как оценивается экономический эффект внедрения расчетного оптимального режима компенсации нагрузок предприятия?
7. С какой целью выполняется регулирование мощностей компенсирующих устройств?
8. Пояснить принципы построения графиков регулирования КУ.
9. Почему входные реактивные мощности задаются предприятиям дифференцированно?
10. Что понимается под оптимизацией режима компенсации реактивных мощностей нагрузок?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЦЕХОВОЙ ТП

1. Цель работы

Изучение метода расчета и способа реализации экономически целесообразного режима работы трансформаторов.

2. Введение

Для двухтрансформаторной подстанции с одинаково нагруженными трансформаторами, при неизменном напряжении и при переменной нагрузке потери мощности изменяются во времени:

$$\Delta P(t) = 2\Delta P_{xx} + 2\Delta P_{кз} K_3^2(t), \quad (1)$$

где $K_3(t) = \frac{S(t)}{2S_{нт}}$ — коэффициент загрузки трансформаторов; ΔP_{xx}

— активные потери холостого хода трансформатора; $\Delta P_{кз}$ — активные потери в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке (потери короткого замыкания); $S_{нт}$ — номинальная мощность трансформатора; $S(t)$ — нагрузка двухтрансформаторной подстанции.

При работе одного трансформатора потери мощности для нагрузки

$$\Delta P(t) = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} K_3^2(t), \quad (2)$$

где $K_3(t) = \frac{S(t)}{S_{нт}}$.

Зависимости (1) и (2) потерь от нагрузки показаны на рис. 7.

Пересечение кривых 1 и 2 соответствует нагрузке, для которой потери мощности в двух трансформаторах равны потерям при работе одного трансформатора. Таким образом, при $S(t) > S_A$ целесообразна работа двух трансформаторов, а при $S(t) < S_A$ целесообразно один трансформатор отключать.

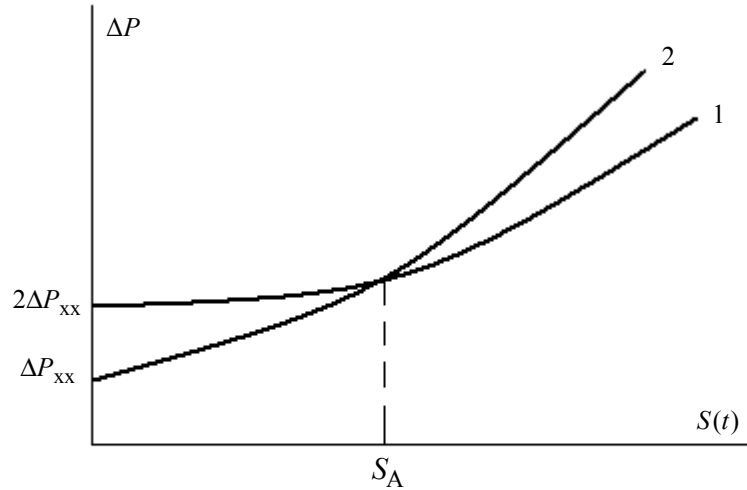
Величину S_A можно вычислить, приравняв правые части выра-

жений (1) и (2):

$$2\Delta P_{xx} + 2\left(\frac{S_A}{2S_{HT}}\right)^2 \Delta P_{K3} = \Delta P_{xx} + \left(\frac{S_A}{S_{HT}}\right)^2 \Delta P_{K3}.$$

Опуская промежуточные преобразования, получим

$$S_A = S_{HT} \sqrt{\frac{2\Delta P_{xx}}{\Delta P_{K3}}}. \quad (3)$$



1

Рис. 7. Зависимость потерь мощности в трансформаторах от их загрузки: 1 – включены два трансформатора; 2 – включён один трансформатор

На практике экономически целесообразный режим работы трансформаторов реализуется редко. Это обусловлено многими факторами: относительно малый экономический эффект, усложнение эксплуатации из-за частых включений и отключений одного из трансформаторов, дополнительные трудности в обеспечении необходимой степени надежности и др.

В настоящей лабораторной работе все эти факторы не учитываются и экономически целесообразный режим работы трансформаторов реализуется на суточном интервале времени с одной лишь целью – определить возможную при этом режиме экономию электроэнергии.

3. Порядок выполнения работы (задание)

3.1. Рассчитать величину S_{Δ} для цеховой ТП по формуле (3) и нанести ее на график полной мощности подстанции, построенной в предыдущей работе (№ 1).

3.2. По графику полной мощности ТП определить моменты времени включения и отключения трансформатора Т3 и задать программу для реализации автоматического управления трансформатором Т3 по времени суток.

3.3. Включить установку. Следить за правильностью реализации намеченного режима работы цеховой ТП и записать показания тока нагрузки для трансформаторов Т3 и Т4.

3.4. По полученным регистрограммам тока построить графики нагрузки по току для трансформаторов Т3 и Т4. Рассчитать потери электроэнергии в трансформаторах Т3 и Т4 и экономию электроэнергии, полученную за счет реализации экономически целесообразного режима работы трансформаторов по отношению к постоянной работе одного трансформатора (данные лабораторной работы № 1).

3.5. Рассчитать потери электроэнергии в трансформаторах Т3 и Т4 для такого режима, когда они постоянно включены в течение суток. Сравнить эти потери с потерями при экономически целесообразном режиме работы.

3.6. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- расчет и построение зависимостей потерь в трансформаторах от их загрузки (рис. 7);
- расчет величины S_{Δ} ;
- обоснование выбора уставок времени для реализации экономически целесообразного режима работы трансформаторов;
- графики тока $I(t)$ трансформаторов Т3 и Т4 для реализованного на модели экономически целесообразного режима и расчет потерь;
- расчет потерь для режима постоянной работы в течение суток двух трансформаторов Т3 и Т4;
- оценку экономии электроэнергии, полученной за счет реали-

зации экономически целесообразного режима работы трансформаторов, по отношению к режимам постоянной работы только одного и двух трансформаторов;
– выводы по работе.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

1. Цель работы

Исследование процесса нагрева электрического кабеля при изменяющейся нагрузке и определение расчетной нагрузки.

2. Введение

Процесс нагрева трехжильного кабеля током I описывается дифференциальным уравнением теплового баланса

$$3 I^2 R_o dt = C d\vartheta + A \vartheta dt, \quad (1)$$

где R_o – удельное сопротивление жилы кабеля, Ом/км; C – теплоемкость 1 км кабеля, Вт·с/°С·км; ϑ – температура перегрева кабеля относительно окружающей среды, °С; A – коэффициент теплоотдачи, Вт/°С·км; t – время, с.

Уравнение (1) можно преобразовать к более удобному для решения виду:

$$\frac{C}{A} \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = \frac{3 I^2 R_o}{A}$$

или

$$T_0 \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = \vartheta_m, \quad (2)$$

где $T_0 = \frac{C}{A}$ – постоянная времени нагрева кабеля, с; $\vartheta_m = \frac{3 I^2 R_o}{A}$ – максимальная температура перегрева кабеля при токе I .

Решением уравнения (2) является

$$\vartheta(t) = \vartheta_m - (\vartheta_m - \vartheta_0)e^{-\frac{t}{T_0}}, \quad (3)$$

где ϑ_0 – начальная температура перегрева кабеля.

Для графика тока, показанного на рис. 8, зависимость можно найти следующим образом. При $t < 0$; $I(t) = 0$; $\vartheta = 0$.

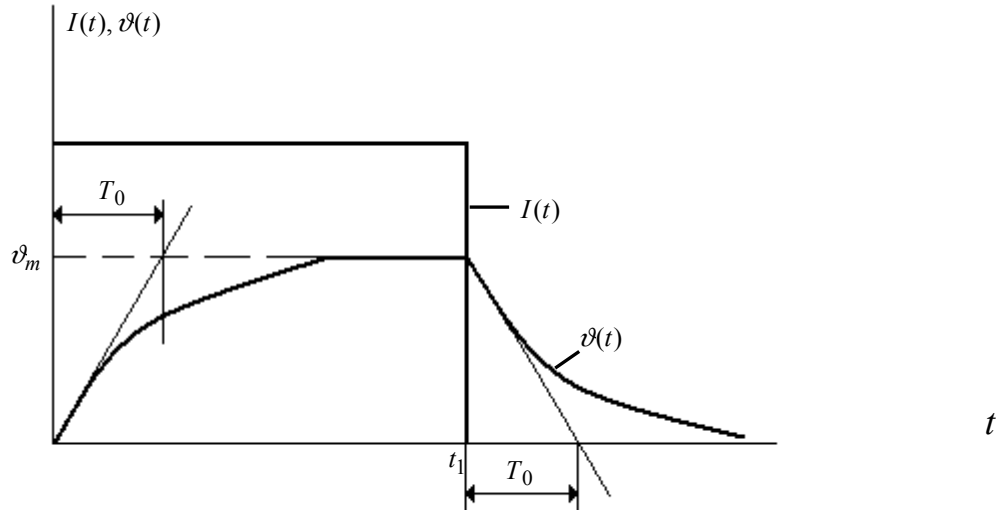


Рис. 8. График тока и температуры перегрева кабеля

В момент времени $t = 0$ включается ток и начинается нагрев кабеля, процесс изменения которого описывается экспонентой (3)

при $\vartheta'_0 = 0$ и $\vartheta'_m = \frac{3I^2 R_0}{A}$,

$$V'(t) = V'_m (1 - e^{-\frac{t}{T_0}}).$$

В момент времени $t = t_1$ ток выключается и кабель остывает в соответствии с (3), но при $\vartheta''_m = 0$ и $\vartheta''_0 = \vartheta'_m$:

$$\vartheta''(t) = \vartheta''_0 e^{-\frac{t}{T_0}} = \vartheta'_m e^{-\frac{t}{T_0}}.$$

Таким образом, процесс перегрева является инерционным по сравнению с процессом изменения нагрузки, что обуславливает некоторую сложность в определении расчетной нагрузки при изменчивом $I(t)$ [1].

Если представить себе, что каким-либо образом получен график $\vartheta(t)$ для заданного $I(t)$, то расчетная нагрузка определяется достаточно просто из выражения

$$I_p = \sqrt{\frac{\vartheta_{\max} A}{3 R_0}}, \quad (4)$$

где $\vartheta_{\max} = \max \{\vartheta(t)\}$.

В настоящей лабораторной работе график зависимости $\vartheta(t)$ находится экспериментально с помощью встроенного в стенд датчика температуры перегрева кабеля. Запись графика $\vartheta(t)$ на суточном цикле времени производится на экране монитора.

3. Порядок проведения работы (задание)

3.1. Подготовить установку к работе: включить питание, включить трансформатор Т4, отключить Т3, отключить БК3, БК4.

3.2. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и произвести регистрацию графика $\vartheta(t)$.

3.3. Построить на одном рисунке график тока кабеля, питающего трансформатор Т4 (по регистрограмме тока, записанной в лабораторной работе № 1) и график перегрева кабеля $\vartheta(t)$.

3.4. Для участка графика заданного преподавателем, рассчитать в соответствии с выражением (3) график $\vartheta(t)$ и сопоставить его с графиком $\vartheta(t)$, полученным экспериментально. Для расчета использовать осредненный на последовательных часовых интервалах времени график $I(t)$, построенный в лабораторной работе № 1.

3.5. По графику $\vartheta(t)$ найти $\vartheta_{\max} = \max \{\vartheta(t)\}$ и определить по выражению (4) расчетный ток I_p . Нанести величину I_p на графики $I(t)$ и $\vartheta(t)$. Проанализировать результаты и сделать выводы.

3.6. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- формулировку задачи лабораторного исследования;
- графики $I(t)$ и $\vartheta(t)$, вычерченные на одном рисунке;
- расчет $\vartheta(t)$ для заданного участка графика (по п.3.4);
- расчет величины I_p ;
- выводы по работе и ответы на контрольные вопросы.

4. Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка к работе состоит в следующем:

- 1) повторение теоретического материала по вопросам расчетных электрических нагрузок [1];
- 2) подготовка к ответам на контрольные вопросы;
- 3) выполнение расчетной части по п. 3.4 задания.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое расчетная электрическая нагрузка?
2. Что такое длительно допустимая нагрузка кабеля? Почему эта нагрузка зависит от способа прокладки кабеля?
3. Чем определяется величина перегрева кабеля при изменчивом во времени графике $I(t)$?
4. Какими факторами определяется величина максимального перегрева $\vartheta_{\max} = \max \{\vartheta(t)\}$ при изменчивом $I(t)$?
5. Чем ограничивается максимальный допустимый перегрев кабеля?
6. В чем состоит сущность вероятностной модели расчетной нагрузки?

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЕНСАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

1. Цель работы

Изучение методики исследования высших гармоник токов и напряжений в промышленных электросетях и работы фильтрокомпенсирующего устройства.

2. Введение

Источниками высших гармоник токов и напряжений в распределительных электросетях являются так называемые нелинейные нагрузки. Это потребители электроэнергии, вольт-амперная характе-

ристика которой нелинейна. К ним относятся: вентильные преобразователи, газоразрядные лампы, электродуговые печи и сварочные установки. Нелинейные нагрузки потребляют из сети несинусоидальный ток, что приводит к искажению кривой напряжения в сети.

Высшие гармоники отрицательно влияют на работу электрических сетей и некоторых электроприемников, поэтому в ряде случаев требуется разработка специальных мероприятий для улучшения формы кривой напряжения в сети.

Периодическую несинусоидальную кривую напряжения $U(t)$ можно разложить в ряд Фурье:

$$U(t) = U_0 + \sum_{v=1}^{\infty} U_{vm} \cdot \sin(v\omega t + \Psi_v), \quad (1)$$

где U_0 – постоянная составляющая. В трехфазных промышленных электросетях постоянная составляющая напряжения, как правило, отсутствует, поэтому $U_0 = 0$; U_{vm} – амплитудное значение гармоники напряжения; Ψ_v – фаза v -й гармоники напряжения.

В некоторых случаях ряд Фурье удобно записывать в другом виде:

$$U(t) = \sum_{v=1}^{\infty} (U'_{vm} \cdot \cos v\omega t + U''_{vm} \cdot \sin v\omega t),$$

При этом $\Psi_v = \arctg U''_{vm} / U'_{vm}$, а коэффициенты ряда определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} U'_{vm} &= \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m U_i \sin v\Theta_i, \\ U''_{vm} &= \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m U_i \cos v\Theta_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где m – число интервалов квантования исходной несинусоидальной кривой $U(t)$ на интервале, равном одному периоду; U_i , Θ_i – ордината кривой $U(t)$ и угол, соответствующий i -му интервалу квантования ($i = 1, 2, \dots, m$). В соответствии с ГОСТ 13109-97 уровень высших гармоник напряжения в сети оценивается коэффициентом несинусоидальности:

$$K_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_{\text{н}}}, \quad (3)$$

где $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение сети; U_v – действующее значение напряжения v -й гармоники ($v = 2, 3, 4, \dots, 13$).

Уровень высших гармоник напряжения или тока в действующих электроустановках можно оценить двумя способами: расчетным (вычисление коэффициентов ряда по снятой с помощью осциллографа исходной нелинейной кривой) и аппаратным (измерение действующих значений напряжений гармоник с помощью специального измерительного прибора).

Уменьшение уровня высших гармоник напряжения в распределительных сетях достигается с помощью подключения нелинейных нагрузок на отдельный трансформатор, увеличения числа фаз выпрямления в схемах вентилях, уменьшения сопротивления системы, а также установкой специальных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). ФКУ рассчитывается и устанавливается для фильтрации конкретной высшей гармоники, преобладающей в дискретном спектре. Оно представляет собой последовательно соединенные реактор и конденсаторную батарею [1].

В моделируемой системе электроснабжения источником высших гармоник является нелинейная нагрузка, подключенная к силовому пункту СП (рис. 1). Эта нагрузка представляет мощный однофазный неуправляемый выпрямитель, который потребляет из сети 220 В ток, содержащий высшие гармоники [1]. Порядок (номера) гармоник сетевых токов определяется выражением

$$v = n \cdot p \pm 1,$$

где p – число фаз преобразователя; $n = 1, 2, 3, \dots$, а ток гармонической составляющей $I_v = \frac{I_1}{v}$.

Силовой пункт СП имеет значительную электрическую удаленность от ТП, т. е. питается линией 380 В с большим сопротивлением и поэтому в напряжении на шинах СП имеется довольно существенный уровень высших гармоник напряжения. Для снижения этого уровня установлен силовой фильтр третьей гармоники (ФКУ). Лабораторная работа включает два этапа исследований. Первый – оценка уровня высших гармоник и коэффициента несинусоидальности на-

пряжения на шинах СП при отключенном ФКУ. Второй – оценка эффективности снижения уровня высших гармоник напряжения с помощью ФКУ третьей гармоники.

Определение высших гармоник несинусоидальной кривой тока или напряжения возможно двумя путями: с помощью специальных приборов – измерителей нелинейных искажений (несинусоидальности) или с помощью графоаналитического расчета (по формулам (2)). В лабораторной работе используется второй путь. Исследуемая несинусоидальная кривая с экрана монитора переносится на бумагу. Время развертки монитора для удобства расчетов должно составлять период промышленной частоты (0,02 с). На бумаге период разбивается на m равных частей ($m = 12$ или 24) и с помощью линейки измеряются координаты исследуемой кривой в $m + 1$ точках (по краям всех m интервалов). Расчет гармоник производится по выше приведенным формулам.

Погрешность расчетов определяется точностью осциллографирования исследуемой кривой. Осциллографирование с помощью «срисовывания» кривой с экрана монитора, конечно, не может дать хороших результатов, но их все же можно использовать для приближенных оценок (при отсутствии измерительных приборов).

Фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ или силовой фильтр для конкретной, например, k -й гармоники, представляет собой последовательно соединенные конденсаторную батарею, реактор и активное сопротивление [1], параметры которых определяются следующим

$$\frac{1}{k\omega C_{кб}} = k\omega L_p; R = 0,1 - 0,2 \text{ Ом.}$$

Для k -й гармоники ФКУ представляет собой «закоротку» в сети [$X_{ФКУ}(k) = 0$], для первой основной гармоники – компенсирующее устройство с эквивалентным емкостным сопротивлением $X_{ФКУ1}$ (рис. 9).

3. Порядок выполнения работы (задание)

3.1. Подготовить установку к осциллографированию напряжения на шинах СП и тока $i_{нн}$ нелинейной нагрузки: включить установку, включить нагрузку $S1$, трансформатор Т4 (остальные элементы мнемосхемы могут быть в любом состоянии), выключить ФКУ, включить монитор и подключить его вход к датчику тока и шинам СП, настроить монитор так, чтобы период исследуемой кривой зани-

мал весь его экран, подготовить бумагу и запустить установку нажатием кнопки «Пуск». Следить за формой исследуемой кривой на экране монитора.

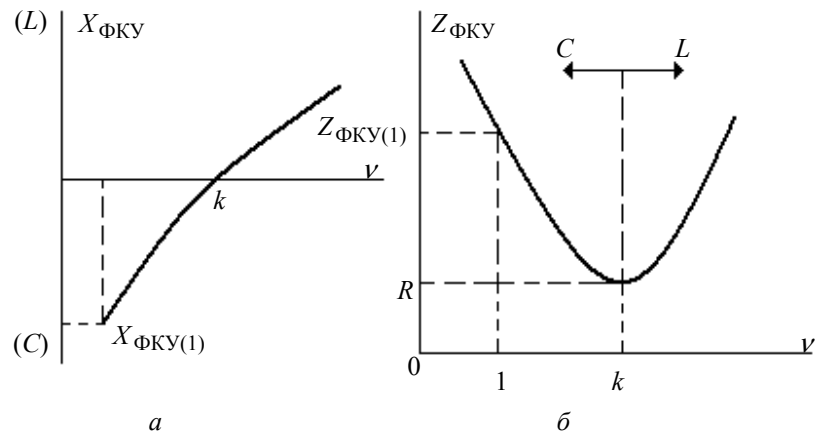


Рис. 9. Частотная характеристика фильтра k -й гармоники:
 a – реактивное сопротивление; b – полное сопротивление ФКУ

3.2. В момент времени, заданный преподавателем, остановить моделирование суточного графика кнопкой «Остановка», чем обеспечивается стабильность исследуемой кривой на экране монитора. Зарисовать исследуемые кривые (сначала кривую напряжения на шинах СП, а затем кривую тока нелинейной нагрузки).

3.3. Провести обработку осциллограммы для расчета высших гармоник в соответствии с п.2. Рассчитать высшие гармоники в кривых тока и напряжения. Для кривой напряжения рассчитать коэффициент несинусоидальности по формуле (3), вычертить на графике несинусоидальную кривую напряжения, а также первую, третью и пятую гармоники. Вычислить коэффициенты третьей и пятой гармоник.

3.4. Включить ФКУ и провести осциллографирование тока ФКУ и напряжения на шинах СП. Выключить установку.

3.5. Аналогично п.3.3 обработать осциллограммы и вычислить гармоники для исследуемых кривых $U(t)$, $i_{ФКУ}(t)$. Для напряжения на шинах СП рассчитать коэффициент несинусоидальности и сравнить его значение со значением, вычисленным в п.3.3. Вычертить на от-

дельных графиках осциллограммы, первую, третью и пятую гармоники для напряжения и тока ФКУ соответственно. Провести их анализ.

3.6. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- формулировку задачи лабораторного исследования, графики $U(t)$, $i_{\text{нн}}$ и их первой, третьей и пятой гармоник для режима без ФКУ;
- расчет коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициентов третьей и пятой гармоники;
- графики $U(t)$, $i_{\text{ФКУ}}(t)$ для режима с подключенным ФКУ;
- расчет соответствующих коэффициентов;
- выводы по работе и ответы на контрольные вопросы.

4. Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка к работе состоит в следующем:

- 1) изучение теоретического материала [1, 3];
- 2) подготовка ответов на контрольные вопросы.

5. Контрольные вопросы

1. Какие допустимые значения коэффициента несинусоидальности (3) установлены ГОСТ [2] для электрических сетей и почему?
2. Каковы причины появления высших гармоник напряжения в электрических сетях промышленных предприятий?
3. Почему вентильный преобразователь потребляет из сети несинусоидальный ток?
4. Какие существуют способы уменьшения уровня высших гармоник напряжения в промышленных электросетях?
5. Начертите векторную диаграмму токов и напряжений ФКУ (для первой гармоники).
7. Для чего в схеме ФКУ используется активное сопротивление?

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХ ПО ЭЛЕКТРОПИТАНИЮ В
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ**

1. Цель работы

Исследование провалов напряжения в промышленных электросетях, являющихся помехами по электропитанию для цифровых технических средств, импульсных систем управления установок различного назначения.

2. Введение

В ГОСТ [2] установлены новые показатели качества электроэнергии, характеризующие кратковременные искажения напряжения в сети, возникающие при различных переходных процессах. Это вызвано тем, что кратковременные искажения напряжения являются помехами по электропитанию для цифровых и импульсных технических средств. Все помехи по электропитанию принято делить на два вида: длительные (провалы и выбросы напряжения длительностью от единиц миллисекунд до нескольких секунд) и импульсные – коммутационные перенапряжения длительностью измеряемой миллисекундами и микросекундами.

В данной лабораторной работе исследуются только провалы напряжения, для которых ГОСТ [2] устанавливает следующие параметры: Δt – длительность провала напряжения, с; ΔU – глубина провала напряжения, %.

Причины возникновения провалов напряжения в электрических сетях предприятий рассмотрены в работе [1]. Все множество этих причин можно разделить на два вида. Первый – провалы напряжения, «приходящие» из сетей энергосистемы, второй – провалы, вызываемые явлениями в электросетях предприятий (пиковые нагрузки, аварийные переключения и др.).

В лабораторной работе смоделированы оба указанных вида провалов. Причем провал второго вида вызывается пиковой нагрузкой на стороне 0,4 кВ цеховой ТП и обусловлен потерей напряжения от пиковой нагрузки на сопротивлении трансформатора 10/0,4 кВ.

В лабораторной работе необходимо с помощью монитора определить время провалов напряжения, их глубину и длительность, а также среди зафиксированных провалов выделить провалы первого и

второго вида. Глубина ΔU провалов второго вида может быть уменьшена при параллельной работе трансформаторов Т3 и Т4.

3. Порядок проведения работы (задание)

3.1. Включить питание лабораторного стенда, включить нагрузку $S1$, отключить трансформатор Т3. Остальные элементы мнемосхемы могут быть в любом состоянии (включено или отключено). Подключить монитор для контроля напряжения на шинах 0,4 кВ цеховой ТП. Настроить монитор таким образом, чтобы можно было оценить глубину и длительность провала наблюдаемого на экране напряжения.

3.2. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и, внимательно наблюдая на экране монитора за исследуемым напряжением, зафиксировать провалы напряжения (время, глубину, длительность). Проанализировать результаты наблюдений, выявив среди зафиксированных те провалы, которые вызваны пиковой нагрузкой в сети 0,4 кВ цеховой ТП.

3.3. Включить трансформатор Т3 на параллельную работу с трансформатором Т4 и повторить эксперимент в соответствии с п.3.2. Оценить степени уменьшения глубины провалов напряжения, обусловленных пиковой нагрузкой в сети 0,4 кВ.

3.4. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- формулировку задачи лабораторного исследования;
- результаты наблюдений по пп. 3.2. и 3.3 в форме таблицы с указанием времени посадки, ее длительности и глубины, а также вида (первый или второй);
- выводы по работе и ответы на контрольные вопросы.

4. Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка к работе состоит в следующем в изучении теоретического материала по литературе [1, 2, 3] и в подготовке ответов на контрольные вопросы.

5. Контрольные вопросы

1. Каковы причины появления провалов напряжения в промышленных электросетях?
2. Опишите механизм воздействия провалов напряжения на

цифровые и импульсные системы управления.

3. Какими путями можно обеспечить устойчивость цифровых систем управления к провалам напряжения?

4. Какие нормы на провалы напряжения установлены в ГОСТ 13109-97 [2] ?

Лабораторная работа № 8

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНЫХ НАГРУЗОК В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

1. Цель работы

Исследование основных принципов компенсации реактивных нагрузок (КРН) в промышленных электрических сетях (ПЭС). С этой целью в работе предусмотрено: вычисление мощностей компенсирующих устройств (КУ), реализация расчетного режима реактивной мощности на лабораторной модели, оценка влияния КРН на режим напряжения и расчет экономического эффекта.

2. Введение

Обмен реактивной мощностью между системой электроснабжения предприятия и электроэнергетической системой (ЭЭС) регламентирован «Правилами пользования электрической и тепловой энергией». Контроль соблюдения этих правил возложен на предприятие «Госэнергонадзор». Установление конкретных требований к режиму реактивной мощности каждого из предприятий осуществляется при ежегодном заключении договора на потребление электроэнергии. Экономически обоснованные входные реактивные мощности ($Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$) [4] задаются предприятиям дифференцированно, в зависимости от потребляемой мощности и электрической удаленности предприятия от основных источников энергии (электростанций). Числовые значения $Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$ определяются в результате расчетов оптимальных режимов работы энергосистемы в периоды ее максимальных ($Q_{Э1}$) и минимальных ($Q_{Э2}$) нагрузок.

В настоящей лабораторной работе исследуется узел нагрузки, схема замещения которого показана на рис. 4.

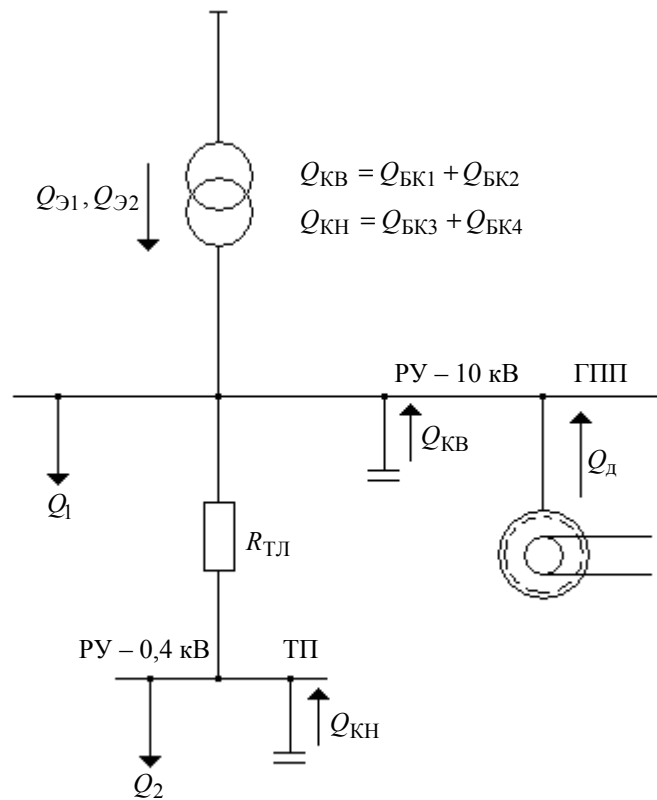


Рис. 4. Схема замещения узла нагрузки

Схема содержит только одну из секций ГПП (правую секцию), поскольку вторая условно считается абсолютно аналогичной. Граница балансовой принадлежности предусмотрена на уровне высоковольтных вводов трансформаторов ГПП. На границе сводятся контрольные балансы активной и реактивной мощностей. Контроль осуществляется на последовательных получасовых интервалах времени при помощи счетчиков энергии с фиксированием максимумов или при помощи специальных информационно-измерительных систем.

В лабораторной модели источниками реактивной мощности являются: электроэнергетическая система ($Q_{Э1}$, $Q_{Э2}$), синхронный электродвигатель ($Q_{д}$), конденсаторные установки БК1, БК2 напря-

жением 10 кВ ($Q_{кв}$) и БКЗ, БК4 напряжением 0,4 кВ ($Q_{кн}$), потребителями – нагрузка на шинах 10,5 кВ (Q_1) и нагрузка ТП (Q_2).

Наилучшим (оптимальным) режимом компенсации реактивных нагрузок будет режим, соответствующий минимальной величине годовых расчетных затрат и удовлетворяющий требованиям электроэнергетической системы [4]. Для нахождения этого режима составляется функция расчетных затрат (целевая функция) и записываются ограничения [4, 5]. Оптимальными считаются такие мощности компенсирующих устройств, при которых целевая функция принимает минимальное значение в области допустимых решений. Область допустимых решений определяется ограничениями, накладываемыми на мощности КУ. Расчет оптимальных мощностей КУ в описанной выше постановке задачи производится с помощью методов математического программирования.

В лабораторной установке моделируется не вся ПЭС, а только ГПП и одна из цеховых подстанций с питающей ее кабельной линией электропередачи. Нагрузка Q_1 представляет собой суммарную реактивную мощность, потребляемую остальными ТП, число и мощность которых не известны. В этих условиях задачу оптимизации размещения КУ можно решать без применения оптимизационных методов, разделив ее на два этапа.

Этап первый. Рассматривается ТП (рис. 5) и определяется $Q_{кн}$.

Для определения $Q_{кн}$ записывается функция годовых расчетных затрат

$$Z(Q_{кн}) = E \cdot \Delta K_n \cdot Q_{кн} + C_o \left[\Delta P_n \cdot Q_{кн} + \frac{R_{гп}}{10^3 \cdot U^2} (Q_2^m - Q_{кн})^2 \right], \quad (1)$$

где E – коэффициент отчислений от капиталовложений (нормативные отчисления, отчисления на эксплуатацию и восстановление оборудования). Численное значение E следует принять равным 0,223 о.е.; ΔK_n – удельная стоимость конденсаторных установок низкого напряжения (6 руб/кВАр); C_o – удельная стоимость потерь активной мощности (задается преподавателем в пределах от 40 до 70 руб/кВт); ΔP_n – удельные потери активной мощности в конденсаторных установках

10 кВ

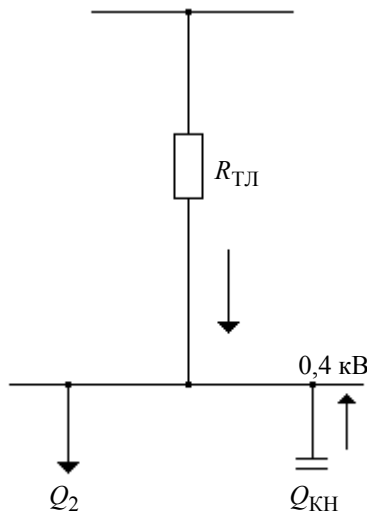


Рис. 5. Расчётная схема замещения для первого этапа расчёта

низкого напряжения (0,003 кВт/кВАр); $R_{ТЛ}$ – приведенное к напряжению 10 кВ сопротивление трансформатора цеховой ТП и питающей его линии электропередачи, Ом. Величина этого сопротивления определяется по данным табл. 1 описания лабораторной установки; U – среднее напряжение на шинах ГПП (10 кВ); Q_2^m – наибольшая реактивная мощность нагрузки трансформатора Т4 в период максимальной активной мощности нагрузки энергосистемы (для упрощения работы считаем, что трансформатор Т3 отключен и в расчетах не учитывается). Определяется по графику нагрузки Т4, полученному в работе № 1. Период максимума задается преподавателем.

$$R_{ТЛ} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U^2}{S_{НТ}^2} 10^3 + r_o \cdot l, \quad (2)$$

где $\Delta P_{кз}$ – потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт (табл. 1); $S_{НТ}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА; r_o – удельное активное сопротивление линии электропередачи, Ом/км; l – длина линии электропередачи, км.

Мощность конденсаторной батареи определяется из уравнения

$$\frac{dZ}{dQ_{\text{кн}}} = 0. \quad (3)$$

Расчетное выражение имеет вид

$$Q_{\text{кн}} = Q_2^m - \frac{E \cdot \Delta K_{\text{н}} + C_o \cdot \Delta P_{\text{н}}}{2 C_o \cdot R_{\text{тл}}} U^2 \cdot 10^3, \text{кВАр}. \quad (4)$$

Этап второй. На этом этапе рассматривается задача нахождения оптимальных значений $Q_{\text{кв}}$ и $Q_{\text{д}}$ (рис. 6). Величина нескомпенсированной мощности, передаваемой через трансформатор Т4, показана на схеме как $Q_{\text{т}}$.

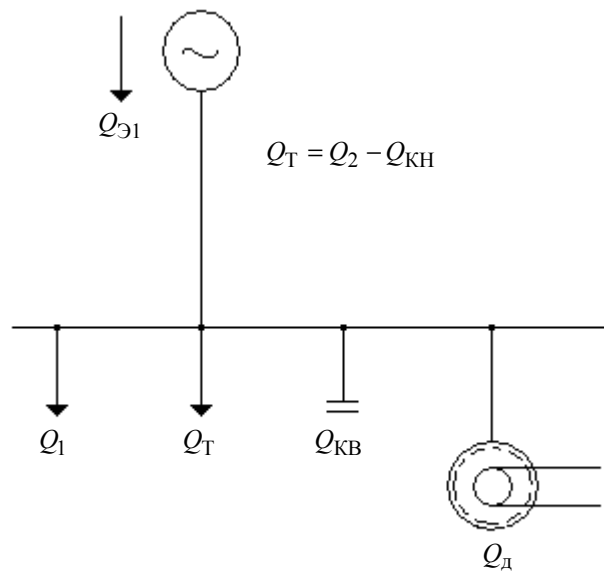


Рис. 6. Расчётная схема замещения для второго этапа расчётов

Функция годовых расчетных затрат для этого этапа расчетов имеет вид

$$3(Q_{\text{кв}}, Q_{\text{д}}) = E \cdot \Delta K_{\text{в}} \cdot Q_{\text{кв}} + C_o (\Delta P_{\text{кв}} \cdot Q_{\text{кв}} + K1 \cdot Q_{\text{д}} + K2 \cdot Q_{\text{д}}^2) \text{ руб/год}, \quad (5)$$

где E, C_o – см. выражение (1); $\Delta K_{\text{в}}$ – удельная стоимость конденсаторных батарей высокого напряжения (5 руб/кВАр); $\Delta P_{\text{в}}$ – удельные потери активной мощности в конденсаторных установках высокого напряжения (0,002 кВт/кВАр); $K1, K2$ – коэффициенты, характеризующие потери активной мощности в СД, зависящие от $Q_{\text{д}}$ ($K1 = 0,011$ кВт/кВАр, $K2 = 0,00019$ кВт/кВАр).

Функция Лагранжа

$$L = (Q_{\text{кв}}, Q_{\text{д}}, \lambda) = 3(Q_{\text{кв}}, Q_{\text{д}}) + \lambda(Q_1^m + Q_{\text{т}} - Q_{\text{Э1}} - Q_{\text{кв}} - Q_{\text{д}}), \quad (6)$$

где Q_1^m – реактивная мощность нагрузки на шинах 10 кВ ГПП в период максимальной активной мощности нагрузки ЭЭС.

Мощности $Q_{\text{кв}}$ и $Q_{\text{д}}$ определяются решением системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dQ_{\text{кв}}} &= 0; \\ \frac{dL}{dQ_{\text{д}}} &= 0; \\ \frac{dL}{d\lambda} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) можно получить выражение для расчета $Q_{\text{кв}}$ и $Q_{\text{д}}$ в общем виде

$$Q_{\text{д}} = \frac{1}{K2} \left(\frac{E \cdot \Delta K_{\text{в}}}{C_o} + \Delta P_{\text{кв}} - K1 \right), \text{ кВАр}; \quad (8)$$

$$Q_{\text{кв}} = Q_1^m + Q_{\text{т}} - Q_{\text{Э1}} - Q_{\text{д}}, \text{ кВАр}. \quad (9)$$

С помощью (4), (8), (9) вычисляются необходимые установленные мощности конденсаторных батарей и наибольшая реактивная мощность СД. Отрицательные значения расчетных мощностей свидетельствуют об отсутствии экономической целесообразности использования соответствующего источника реактивной мощности. Его

значение принимается равным нулю. Величина Q_d не должна превышать допустимых значений по условиям нагрева статора и ротора СД с учетом его загрузки по активной мощности. Проверка СД по условиям нагрева в лабораторной работе не предусмотрена.

Полное использование всех КУ экономически обосновано только в период максимальной нагрузки ЭЭС. При существенно изменяющемся графике реактивной мощности нагрузки требуется регулирование КУ. В лабораторной установке предусмотрено ручное дискретное регулирование Q_d и автоматическое регулирование конденсаторных батарей. Графики регулирования КУ строятся на основании оптимизационных расчетов с учетом требований ЭЭС

($Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$). Регулирование КУ должно обеспечить минимальные потери электроэнергии и требуемый уровень качества напряжения.

Для отдельного узла нагрузки, который исследуется в данной работе, оптимизация не требуется. Графики регулирования КУ в этом случае могут быть построены без расчетов. Основой для их построения являются графики реактивной нагрузки на шинах 10 кВ и 0,4 кВ. При построении графиков регулирования следует учесть:

1. В период максимальной активной мощности нагрузки ЭЭС потребление реактивной мощности не должно превосходить величину $Q_{Э1}$.

2. В период минимальной нагрузки потребляемая реактивная мощность должна быть не меньшей, чем $Q_{Э2}$.

3. Порядок выполнения работы (задание)

3.1. Получить у преподавателя следующую исходную информацию:

а) $Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$;

б) интервалы времени, соответствующие периодам максимума и минимума активной мощности нагрузки ЭЭС;

в) удельную стоимость потерь активной мощности C_o .

3.2. По формулам (4), (8), (9) определить мощности КУ (два этапа). Полученные значения округлить до ближайших возможных величин, указанных в табл. 1 описания лабораторной установки. Мощность нагрузки взять по графику, полученному в лабораторной работе № 1, прочую необходимую информацию следует взять из табл. 1.

3.3. Проверить баланс реактивной мощности на шинах ГПП в часы максимума активной нагрузки ЭЭС. В случае необходимости выполнить корректировку мощностей КУ с целью обеспечения ба-

ланса.

3.4. Построить графики регулирования мощностей конденсаторных батарей ($Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$) и синхронного двигателя (Q_d). При построении графиков рекомендуется обратить внимание на технико-экономические характеристики и эффективность располагаемых КУ.

3.5. Проверить баланс реактивной мощности на шинах ГПП в часы минимума активной нагрузки ЭЭС.

3.6. Задать схему автоматического управления анцапфами Т2 (работа № 2) и мощностями конденсаторных батарей в соответствии с построенными графиками их регулирования. Привести лабораторную модель в исходное рабочее состояние (включить S1, Т4, СД, отключить ТЗ, БК1, БК2, БК3, БК4).

3.7. Включить лабораторный стенд и выполнить следующее:

а) по показаниям приборов записать графики изменения активной и реактивной мощностей нагрузок трансформаторов Т2 и Т4 с учетом расчетных мощностей КУ и их регулирования.

б) записать по показаниям вольтметров напряжения на шинах 10 кВ ГПП и 0,4 кВ ТП с учетом реализации мероприятий по их улучшению (см. работу № 2.).

Запись графиков нагрузок и напряжений (п. «а» и «б») необходимо производить одновременно.

3.8. Построить графики нагрузки (P и Q) с учетом КУ и сравнить их с графиками, полученными в работе № 1.

3.9. Построить гистограммы, вычислить математические ожидания и дисперсии напряжений на шинах 10 и 0,4 кВ с учетом КРН. Оценить влияние КУ на режим напряжения, сравнив полученные результаты с соответствующими данными работы № 2.

3.10. Оценить экономический эффект КРН на суточном интервале времени в киловатт-часах сэкономленной электроэнергии. Оценку эффекта выполнить сравнением потерь энергии в трансформаторах Т2, Т4 и кабельной линии, вычисленных в работе № 1 по графикам нагрузки, не учитывающим КУ, и потерь в тех же элементах, но с учетом КУ и их регулирования.

3.11. Оформить отчет о лабораторной работе, который должен содержать:

а) таблицу исходных данных для выполнения работы, включая параметры, полученные у преподавателя;

б) расчет мощностей КУ,

в) графики регулирования КУ,

г) графики активной и реактивной мощностей нагрузки Т2 и Т4 с учетом КУ,

- д) графики изменения напряжений на шинах 10 кВ ГПП и 0,4 кВ ТП,
- е) гистограммы напряжений на шинах 10 кВ ГПП и 0,4 кВ ТП;
- ж) расчет экономического эффекта;
- з) выводы по результатам работы и ответы на контрольные вопросы.

4. Подготовка к работе

В процессе подготовки к работе необходимо ознакомиться с ее описанием, изучить рекомендованную литературу и соответствующие разделы конспекта лекций. Заготовить бланки для записи показаний приборов и продумать ответы на контрольные вопросы.

5. Контрольные вопросы

1. Дать понятие реактивной мощности, пояснить ее физический смысл и особенности в сравнении с активной.
2. Чем определяются предельные значения реактивной мощности, которую может выдать в сеть синхронная машина?
3. Дать сравнительную характеристику источников реактивной мощности, используемых в СЭПП.
4. Каким образом реактивная мощность влияет на режим напряжения электрической сети?
5. Требования, предъявляемые ЭЭС к режиму реактивной мощности СЭПП.
6. Как оценивается экономический эффект внедрения расчетного оптимального режима компенсации нагрузок предприятия?
7. С какой целью выполняется регулирование мощностей компенсирующих устройств?
8. Пояснить принципы построения графиков регулирования КУ.
9. Почему входные реактивные мощности задаются предприятиям дифференцированно?
10. Что понимается под оптимизацией режима компенсации реактивных мощностей нагрузок?

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Лабораторный практикум по циклу, состоящему из семи лабораторных работ, проводимых на одной установке, представляет собой комплексное исследование режимов работы типовой СЭПП. Поэтому по всем семи работам каждая бригада студентов готовит единый отчет, имеющий один титульный лист, оглавление, описание лабораторной установки, включающее мнемосхему (рис. 1), параметры модели (табл. 1), протоколы лабораторных работ. В конце каждого протокола проставляются личные подписи студентов, проводивших работу, и дата.

Все страницы отчета нумеруются. Все рисунки и таблицы должны быть также пронумерованы, рисунки должны иметь название, таблицы – заголовки.

После завершения последней лабораторной работы единый отчет брошюруется и сдается руководителю практикума. Зачет по проведенным работам проводится после собеседования с каждым студентом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волобринский С.Д., Каялов Г.М. и др. Электрические нагрузки промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1971. – 264 с.
2. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1997.
3. Ольховский В.Я., Стрельников Н.А. Электроснабжение промышленных предприятий: Методические указания к лабораторным работам / Новосибирский электротехнический институт. – Новосибирск, 1991. – 40 с.
4. Правила пользования электрической и тепловой энергией. – М.: Энергоиздат, 1982.
5. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Высшая школа, 1986.

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Составитель Волков Николай Георгиевич

Подписано к печати 04.04.2004.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать RISO. Усл. печ. л. 2,38. Уч.-изд.л. 2,16.
Тираж 100 экз. Заказ . Цена свободная.
Издательство ТПУ. 634050, Томск, пр. Ленина, 30.