

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

К. Р. Валиуллин, С. В. Митрофанов, А. Д. Чернова

# ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Практикум

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Оренбург  
2021

УДК 621.3  
ББК 31  
В 24

Рецензент – доцент, кандидат технических наук В.Ю. Соколов

**Валиуллин, К. Р.**  
В 24 Энергосбережение в энергетике: практикум / К. Р. Валиуллин, С. В. Митрофанов, А. Д. Чернова; Оренбургский гос. ун–т. – Оренбург: ОГУ, 2021. – 108 с.  
ISBN

Практикум включает в себя указания по проведению лабораторных работ по энергосбережению, направленных на сбережение электрической и тепловой энергии.

Практикум предназначен для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

УДК 621.3  
ББК 31

ISBN

© Валиуллин К. Р.,  
Митрофанов С.В.,  
Чернова А. Д., 2021  
© ОГУ, 2021

## Содержание

Введение.....	7
1 Лабораторная работа №1. Определение удельных потерь активной мощности в линии электропередачи.....	9
1.1 Краткие теоретические и практические сведения.....	9
1.1.1 Классификация потерь в электрических сетях.....	9
1.1.2 Классификация мероприятий по снижению потерь.....	10
1.1.3 Потери мощности и электроэнергии в линии электропередачи. ....	13
1.2 Описание лабораторной установки.....	16
1.3 Указания по проведению эксперимента на стенде.....	18
1.4 Указания по выполнению лабораторной работы в теоретическом формате по вариантам.....	21
1.5 Указания по оформлению отчета по лабораторной работе.....	22
1.6 Контрольные вопросы.....	22
2 Лабораторная работа №2. Уменьшение потерь активной мощности в распределительной электрической сети с односторонним питанием путем поперечной компенсации реактивной мощности нагрузки.....	24
2.1 Краткие теоретические и практические сведения.....	24
2.2 Описание лабораторной установки.....	26
2.3 Указания по проведению эксперимента на стенде.....	27
2.4 Указания по выполнению лабораторной работы в теоретическом формате по вариантам.....	30
2.5 Указания по оформлению отчета по лабораторной работе.....	31
2.6 Контрольные вопросы.....	31

3	Лабораторная работа №3. Уменьшение потерь активной мощности в распределительной электрической сети с двусторонним питанием путем регулирования напряжения .....	33
3.1	Краткие теоретические и практические сведения .....	33
3.2	Описание лабораторной установки.....	36
3.3	Указания по проведению эксперимента на стенде.....	37
3.4	Указания по выполнению лабораторной работы в теоретическом формате по вариантам.....	40
3.5	Указания по оформлению отчета по лабораторной работе.....	41
3.6	Контрольные вопросы .....	42
4	Лабораторная работа №4. Обеспечение высокого коэффициента полезного действия малонагруженного трансформатора путем отключения параллельно с ним работающего трансформатора .....	44
4.1	Краткие теоретические и практические сведения .....	44
4.2	Описание лабораторной установки.....	47
4.3	Указания по проведению эксперимента на стенде.....	47
4.4	Указания по выполнению лабораторной работы в теоретическом формате по вариантам.....	50
4.5	Указания по оформлению отчета по лабораторной работе.....	51
4.6	Контрольные вопросы .....	51
5	Лабораторная работа № 5. Обеспечение высоких коэффициента полезного действия и коэффициента мощности мало нагруженного асинхронного двигателя путем переключения его обмоток со схемы «треугольник» на схему «звезда».....	53
5.1	Краткие теоретические и практические сведения .....	53
5.2	Описание лабораторной установки.....	57
5.3	Указания по проведению эксперимента на стенде.....	59

5.4 Контрольные вопросы .....	63
6 Лабораторная работа №6. Исследование типичных схем хищения в электрических сетях низкого напряжения.....	64
6.1 Краткие теоретические и практические сведения .....	64
6.2 Описание лабораторной установки.....	65
6.3 Указания по проведению эксперимента на стенде.....	66
6.3.1 Подключение однофазного индукционного счетчика электрической энергии СО-И4491М .....	66
6.3.2 Моделирование ненормальных схем подключения однофазного индукционного счетчика СО-И4491 М и оценка недоучтенной им электроэнергии .....	68
6.3.3 Подключение однофазного статического счетчика электрической энергии Меркурий 203.1 .....	72
6.3.4 Моделирование ненормальных схем подключения однофазного статического счетчика Меркурий 203.1 и оценка недоучтенной им электроэнергии .....	74
6.4 Указания по оформлению отчета по лабораторной работе.....	78
6.5 Контрольные вопросы .....	78
7 Лабораторная работа №7. Исследование влияния изменения напряжения на основные характеристики осветительных приборов.....	79
7.1 Краткие теоретические и практические сведения .....	79
7.2 Описание лабораторной установки.....	81
7.3 Указания по проведению эксперимента на стенде.....	82
7.4 Указания по оформлению отчета по лабораторной работе.....	85
7.5 Контрольные вопросы .....	86

8 Лабораторная работа №8. Определение мест повышенных тепловых потерь с помощью тепловизора .....	87
8.1 Краткие теоретические сведения .....	87
8.2 Методика проведения внутренней и наружной тепловизионной съемки	91
8.2.1. Подготовка к измерениям .....	91
8.2.2. Проведение тепловизионного обследования .....	92
8.2.3. Обработка полученных термограмм .....	98
8.3 Практическая часть лабораторной работы.....	105
8.3.1 Определение коэффициентов излучения материала.....	105
8.3.2 Обработка термограмм и составление отчета.....	106
8.4 Контрольные вопросы .....	107
Список использованных источников .....	108

## Введение

Проблемы снижения энергетических затрат и энергосбережения становится все более актуальной в мировом аспекте. Особенно актуальна эта проблема для российской экономики, поскольку в России энергоемкость промышленного производства и социальных услуг оказывается во много раз выше общемировых показателей. Эта проблема еще более обостряется в связи с постоянным увеличением в нашей стране стоимости энергоносителей: природного газа, нефтепродуктов, электроэнергии и т.д. В себестоимости продукции в России доля энергозатрат часто становится доминирующей. В связи с этим, конкурентоспособность отечественной продукции все больше зависит именно от экономного расходования энергетических ресурсов. Подавляющую часть энергоресурсов представляют в настоящее время так называемые невозобновляемые источники энергии в виде органических минеральных топлив. Это природный газ, нефть, уголь, торф и другие виды топлив. Использование этих топлив как энергетических источников приводит к значительным выбросам как парниковых газов, так и вредных веществ. Поэтому проблема энергосбережения тесно связана с решением ряда важных экологических проблем, в том числе и глобальных.

При решении проблем энергосбережения важно определить основные стратегические подходы и методы рационального использования энергоресурсов, которые могут быть как общими для всей экономики, так и специфичными для отдельных отраслей промышленности, сельского хозяйства и социальной сферы. Среди таких наиболее общих подходов в стратегии энергосбережения можно было бы назвать применение высоких ресурсосберегающих технологий в сфере энерготехнологических объектов, использование методов математического моделирования и оптимизации при проектировании и реконструкции предприятий, замену дорогостоящих энергоемких видов энергоносителей, таких как электроэнергия, кокс на более дешевые, в частности, на природный газ, все более широкое использование возобновляемых источников энергии – ветра, солнца, биомассы и др.

В практикуме рассматриваются основные вопросы энергосбережения при передаче и потреблении электрической энергии, приведены схемы экспериментов, позволяющих научиться оценивать потенциал энергосбережения и разрабатывать план мероприятий по экономии электрической и тепловой энергии.

# **1 Лабораторная работа №1. Определение удельных потерь активной мощности в линии электропередачи**

Цель работы: научиться определять величину потерь мощности для линий электропередач с различными параметрами.

## **1.1 Краткие теоретические и практические сведения**

### **1.1.1 Классификация потерь в электрических сетях**

Согласно [1], потери могут классифицироваться по характеру (постоянные или переменные), классам напряжения, элементам, подразделениям и т.д. На рисунке 1.1 представлена классификация потерь исходя из физической природы их появления и особенностей методов расчета.

Можно выделить 4 группы потерь:

1) Технические потери электроэнергии, вызванные физическими процессами, возникающими при передаче электроэнергии. Эти потери определяются расчетным путем ввиду невозможности организации съема показаний в единый момент времени в разветвленной электрической сети. Величина технических потерь определяется характеристиками системы электроснабжения и во многом определяется на этапе проектирования системы электроснабжения.

2) Расход электроэнергии на собственные нужды подстанций, необходимый для работы оборудования и персонала. Расход может быть зафиксирован счетчиками, установленными на трансформаторах собственных нужд. Строго говоря, расход электроэнергии на собственные нужды не является потерями, так как энергия тратится не впустую, а на обеспечение технологического процесса электрической станции или подстанции.

3) Потери электроэнергии, связанные с погрешностями системы учета. Они определяются расчетным путем на основе данных о метрологических характеристиках приборов учета, трансформаторов тока и напряжения. В связи с тем, что приборы учета обладают погрешностями, часть потребленной

электрической энергии может не учитываться, что приводит к дополнительным финансовым затратам.

4) Коммерческие потери, обусловленных хищением электроэнергии. Они не могут быть рассчитаны самостоятельно и определяются как разница между фактическими потерями и суммой предыдущих составляющих.

#### 1.1.2 Классификация мероприятий по снижению потерь.

Потери мощности в электрических сетях определяют с целью их снижения. Определение структуры потерь позволяет выявить наиболее эффективные и быстро окупаемые мероприятия по энергосбережению. Например, если в структуре потерь доминируют технические потери, то есть смысл задуматься над модернизацией оборудования. Если же большую часть потерь составляют коммерческие потери, то очевидным мероприятием будет рейд по выявлению безучетного потребления электрической энергии. Снижение потерь может быть обеспечено за счет технических или организационных мероприятий.

Организационные мероприятия заключаются в оптимизации схем и режимов работы электрических сетей и электростанций, совершенствовании их технического обслуживания [2].

Технические мероприятия включают в себя строительство, реконструкцию электрических сетей и электростанций. Они разделяются на мероприятия по снижению потерь (срок окупаемости не превышает 8 лет) и мероприятия с сопутствующим снижением потерь электроэнергии (срок окупаемости более 8 лет).

Исходя из особенностей получения эффекта мероприятия по снижению потерь (МСП) могут быть разделены на следующие четыре группы:

- 1) мероприятия по совершенствованию режима электрических сетей;
- 2) мероприятия по автоматизации управления режимами электрических сетей;
- 3) мероприятия по реконструкции электрических сетей;
- 4) мероприятия по совершенствованию учета электроэнергии.



Рисунок 1.1 – Классификация потерь электроэнергии в электрических сетях

К мероприятиям по совершенствованию режима электрических сетей относят:

- 1) Размыкание линий 6-35 кВ с двухсторонним питанием в точках, обеспечивающих электроснабжение потребителей при минимальных суммарных потерях электроэнергии в сетях 6-35 кВ и выше;
- 2) Оптимизация режимов замкнутых электрических сетей 110 кВ и выше по реактивной мощности и напряжению;
- 3) Проведение переключений в рабочей схеме сети, обеспечивающих распределение электроэнергии при минимальных потерях;
- 4) Перевод генераторов в режим синхронного компенсатора. Мероприятие рассматривается для малоэкономичных генераторов, выводимых из работы в зависимости от сезонной нагрузки, или генераторов электростанций, работающих на дефицитном топливе;
- 5) Регулирование напряжения в центрах питания радиальных сетей 6-110 кВ, обеспечивающее минимальные потери электроэнергии при допустимых отклонениях напряжения у потребителей электроэнергии;
- 6) Отключение в режимах малых нагрузок одного из трансформаторов на подстанциях с двумя и более трансформаторами;
- 7) Отключение трансформаторов на подстанциях с сезонной нагрузкой;
- 8) Выравнивание нагрузок фаз в сетях 0,4 кВ.

Оптимальные режимы работы ряда устройств определяются местными параметрами текущего режима электрической сети. Их регулирование целесообразно осуществлять с помощью автоматических устройств, установленных непосредственно в месте подключения оборудования. Эффект от их установки заключается в более тщательном отслеживании изменений режима, чем это могло бы быть выполнено диспетчером.

К мероприятиям по автоматизации управления режимами электрических сетей относят [3]:

- 1) установку и ввод в работу автоматических регуляторов напряжения на трансформаторах с РПН. Также это мероприятие производится в целях обеспечения требуемого качества электроэнергии;

2) установку и ввод в работу автоматических регуляторов источников реактивной мощности;

3) установку и ввод в работу средств телеизмерений.

К мероприятиям по совершенствованию учета электроэнергии относят:

1) обеспечение работы измерительных трансформаторов и электросчетчиков в допустимых условиях (отсутствие недогрузки первичных цепей трансформаторов тока (ТТ), перегрузки вторичных цепей ТТ и трансформаторов напряжения (ТН), обеспечение требуемых температурных условий, устранение вибраций оснований счетчиков и т.д.);

2) замену измерительных трансформаторов на трансформаторы с улучшенными характеристиками и с номинальными параметрами, соответствующими фактическим нагрузкам;

3) замену существующих приборов учета на приборы с улучшенными характеристиками;

4) установку приборов технического учета электроэнергии на радиальных линиях, отходящих от подстанций (головной учет);

5) периодические проверки условий работы электросчетчиков расчетного учета у потребителей и выявление хищений электроэнергии.

Обоснование целесообразности замены измерительных трансформаторов и приборов учета на оборудование с улучшенными характеристиками, приоритетную последовательность такой замены и количественную оценку эффективности замены каждого прибора осуществляют на основе расчета снижения потерь электроэнергии, обусловленных погрешностями приборов учета, происходящего при замене приборов.

Установка приборов технического учета электроэнергии на отходящих от подстанции линиях целесообразна на радиальных линиях 35-110 кВ, фидерах 6-10кВ и линиях 0,4 кВ. Их установка позволяет определять фактические небалансы электроэнергии, увеличить точность расчета технических потерь электроэнергии и локализовать очаги коммерческих потерь.

1.1.3 Потери мощности и электроэнергии в линии электропередачи.

Согласно приведенной выше структуре потерь для воздушных линий электропередач рассчитываются следующие значения потерь электроэнергии (ЭЭ):

– потери электроэнергии на корону. Рассчитываются на основе удельных потерь ЭЭ на километр ЛЭП в зависимости от напряжения ВЛ, числа и сечения проводов в фазе, продолжительности видов погоды или региона расположения линии;

– потери электроэнергии от токов утечки по изоляторам. Рассчитываются на основе удельных потерь ЭЭ на километр ЛЭП в зависимости от напряжения ВЛ, группы погоды или региона расположения линии;

– расход электроэнергии на плавку гололеда. Определяется на основе приборов учета, установленных на устройствах плавки гололеда. При отсутствии таких приборов учета рассчитывается на основе удельного расхода ЭЭ на плавку гололеда на километр ЛЭП в зависимости от района расположения ВЛ по гололеду;

– нагрузочные потери электроэнергии рассчитываются в зависимости от информационной обеспеченности по методу оперативных расчетов (более точный) или методу средних нагрузок.

Для определения нагрузочных потерь необходимо учитывать зависимость активного сопротивления ВЛ от температуры:

$$R_{ВЛ} = r_0^{20} \cdot L \cdot (1 + 0,004 \cdot (\Theta - 20) / n_{ц}), \quad (1.1)$$

где  $r_0^{20}$  - удельное активное сопротивление на 1 км провода при его температуре 20°C, Ом/км;

L - длина линии, км;

Θ - средняя температура провода за базовый период, °C;

$n_{ц}$  - количество параллельных цепей, шт.

Нагрузочные потери могут быть рассчитаны с помощью метода оперативных расчетов, либо с помощью метода средних нагрузок. Метод оперативных расчётов является более точным, но для его использования необходимы оперативные сведения об изменении нагрузки линии электропередач. Нагрузочные потери электроэнергии определяются по формуле:

$$\Delta W_{ВЛ} = 3 \cdot R \cdot \sum_{j=1}^M (I_j^2 \cdot \Delta t_j) = R \cdot \sum_{j=1}^M \left( \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} \cdot \Delta t_j \right), \quad (1.2)$$

где  $R$  - активное сопротивление ВЛ, Ом;

$I_j$  - токовая нагрузка ВЛ, принимаемая на интервале времени  $\Delta t_j$  неизменной, А;

$P_j, Q_j$  - значения активной и реактивной мощности, протекающие через элемент электрической сети, принимаемые на интервале времени  $\Delta t_j$  неизменными;

$U_j$  - значение напряжения на элементе электрической сети, принятое на интервале  $\Delta t_j$  неизменным, кВ;

$\Delta t_j$  - интервал времени, в течение которого нагрузка элемента сети с сопротивлением  $R$  принимается неизменной;

$M$  - количество интервалов времени  $\Delta t_j$  в базовом периоде.

Метод средних нагрузок является менее точным, но более простым в использовании. Согласно этому методу нагрузочные потери электроэнергии за базовый период определяются по формуле:

$$\Delta W_H = k_k \cdot \Delta P_{cp} \cdot T \cdot k_{\phi}^2, \quad (1.3)$$

где  $\Delta P_{cp}$  - потери мощности в элементе электрической сети при средних за базовый период нагрузках, кВт

$$\Delta P_{cp} = 3 \cdot I_{cp}^2 \cdot R = \frac{P_{cp}^2 + Q_{cp}^2}{U_{cp}^2} \cdot R, \quad (1.4)$$

$k_{\phi}^2$  - квадрат коэффициента формы графика за базовый период;

$k_k$  - коэффициент, учитывающий различие конфигураций графиков активной и реактивной нагрузки (принимается равным 0,99), о.е.;

$T$  - число часов в базовом периоде, ч.

Коэффициент формы графика определяется по формуле:

$$k_{\phi}^2 = \frac{1 + 2k_3}{3k_3}, \quad (1.5)$$

Коэффициент заполнения графика определяется по формуле:

$$k_3 = \frac{T_{\max}}{T}, \quad (1.6)$$

Средняя нагрузка определяется по формуле:

$$P_{\text{ср}} = \frac{W_T}{T}. \quad (1.7)$$

где  $W_T$  – количество электроэнергии, потребленной за базовый период  $T$ , кВт.ч.

## 1.2 Описание лабораторной установки

Экспериментальная часть лабораторной работы выполняется на стенде «Энергосбережение в системах электроснабжения», состоящем из двух частей (Рисунок 1.2 и 1.3). Для выполнения данной лабораторной работы потребуются блоки, указанные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Перечень аппаратуры

Обозначение на схеме	Наименование	Номер блока
G1	Однофазный источник питания	218.5
A1	Автоматический однополюсный выключатель	359
A2	Однофазный трансформатор	372.1
A3	Модель линии электропередачи	313.3
A4	Активная нагрузка	306.4
A6	Индуктивная нагрузка	324.4
A18	Переключатель	2306
P1	Блок мультиметров	509.2
P2	Измеритель мощностей	507.3

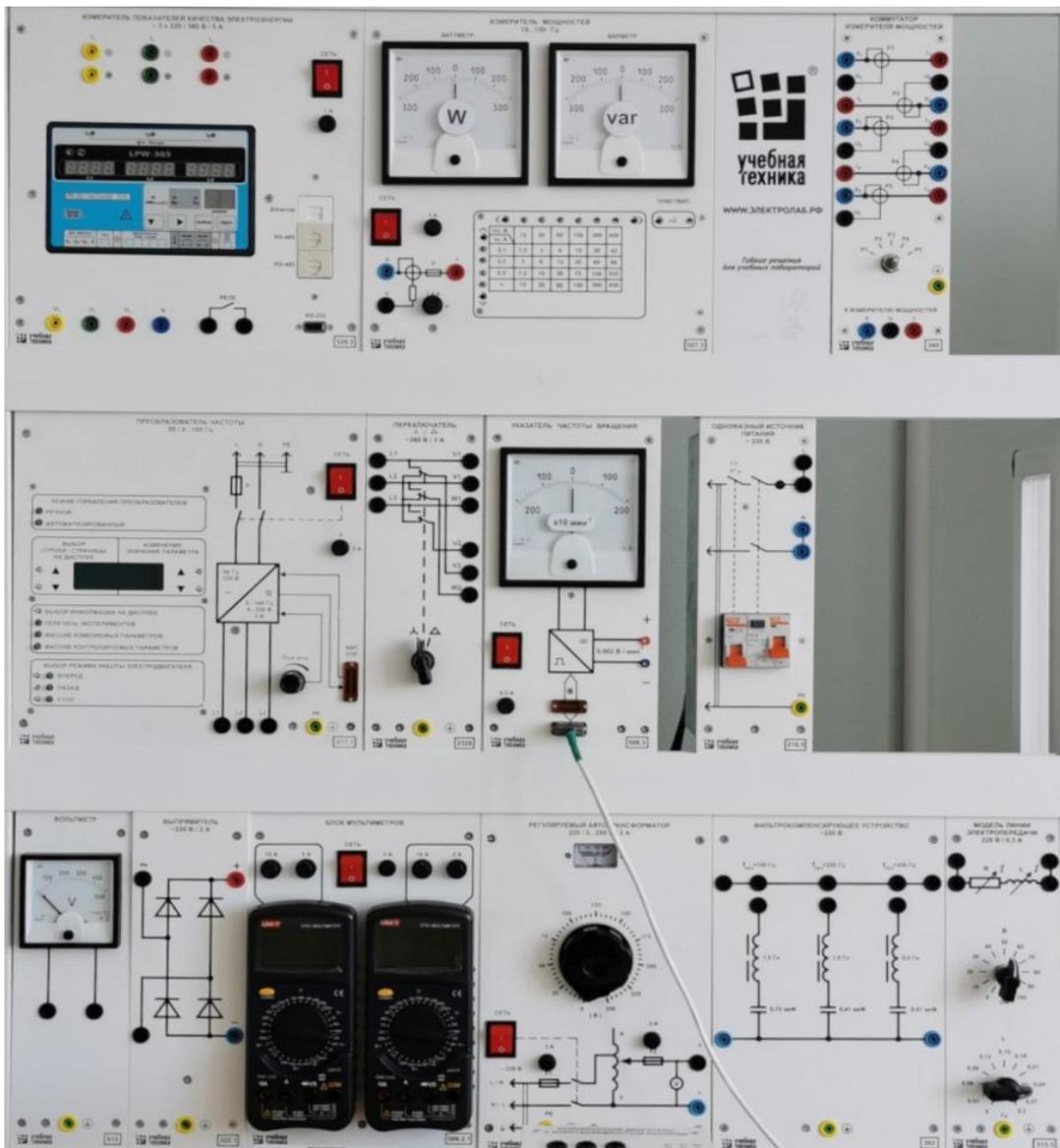


Рисунок 1.2 – Лабораторный стенд, часть 1

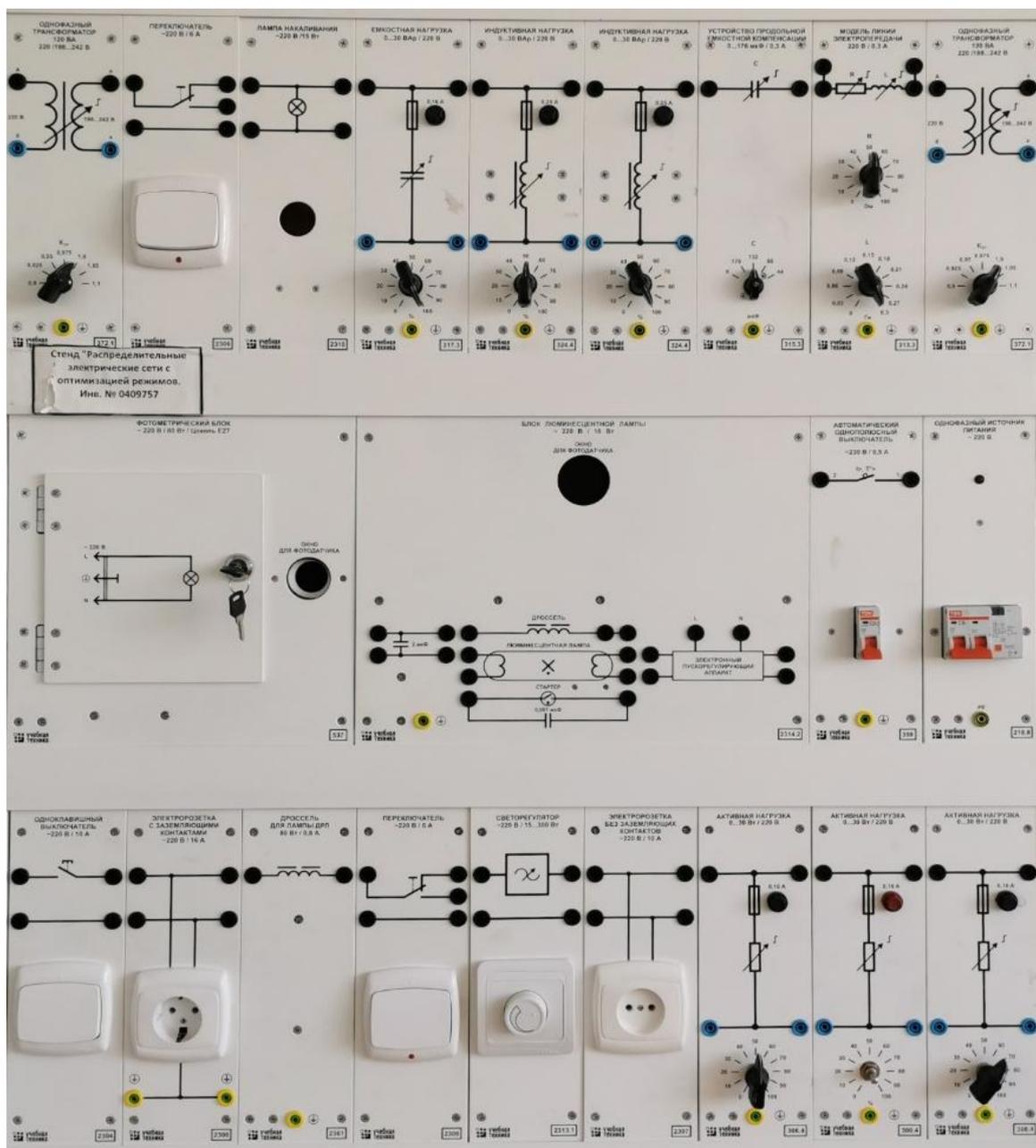


Рисунок 1.3 – Лабораторный стенд, часть 2

### 1.3 Указания по проведению эксперимента на стенде

1 Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2 Соедините гнезда защитного заземления " $\text{⏏}$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" однофазного источника питания G1.

3 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (Рисунок 1.4).

- 4 Отключите (если включен) выключатель А1.
- 5 Переключатель А18 установите в положение I.
- 6 Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора А2, например, равным 1.
- 7 Установите переключателями желаемые параметры модели линии электропередачи А3, например, равными 50 Ом и 0,15 Гн.
- 8 Установите переключателями желаемые параметры нагрузок А4 и А6, например, равными 50%.
- 9 Включите источник G1.
- 10 Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и измерителя мощностей Р2.
- 11 Активизируйте используемые мультиметры.
- 12 Включите выключатель А1.
- 13 С помощью мультиметров, включенных как вольтметры, блока Р1 контролируйте напряжения в начале и конце линии электропередачи А3.
- 14 При положениях I и противоположном I переключателя А18, с помощью измерителя Р2 измерьте соответственно поток мощности **P** в начале линии электропередачи А3 и потери активной мощности **ΔP** в ней.
- 15 По завершении эксперимента отключите источник G1, выключатели «СЕТЬ» измерителя мощностей Р2 и блока мультиметров Р1.
- 16 Определите искомые удельные потери **Δp** в линии электропередачи А3 по формуле:

$$\Delta p = \frac{\Delta P}{P} 100\% , \quad (1.8)$$

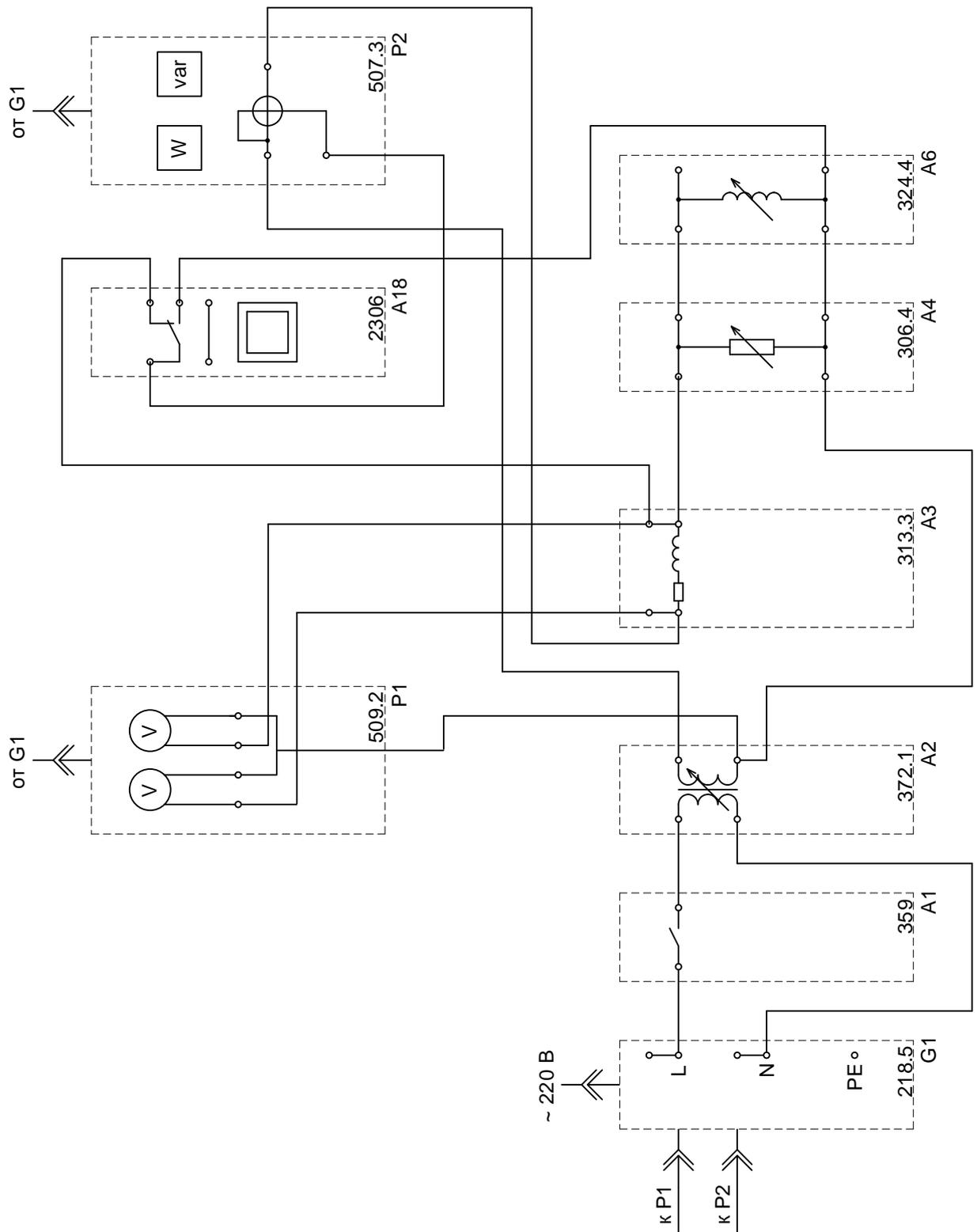


Рисунок 1.4 – Электрическая схема соединений

## 1.4 Указания по выполнению лабораторной работы в теоретическом формате по вариантам

Исходными данными являются параметры линии, представленные в таблице 1.2.

1 Определите индуктивное сопротивление линии  $X_L$  согласно варианту:

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, \quad (1.9)$$

где  $\omega$  – циклическая частота переменного тока (рад/с);

$L$  – индуктивность (Гн);

$f$  – частота электрического тока (Гц).

2 Определите потери активной  $\Delta P_L$  и реактивной  $\Delta Q_L$  мощности в линии:

$$\Delta P_L = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U^2} R_L, \quad (1.10)$$

$$\Delta Q_L = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U^2} X_L, \quad (1.11)$$

где  $P_H$  – активная мощность нагрузки, Вт;

$Q_H$  – реактивная мощность нагрузки, Вт;

$U$  – напряжение, В;

$R_L$  – активное сопротивление линии, Ом;

$X_L$  – индуктивное сопротивление линии, Ом.

3 Определите искомые удельные потери  $\Delta p$  в линии электропередачи по формуле:

$$\Delta p = \frac{\Delta P}{P} 100\%, \quad (1.12)$$

4 Сведите полученные результаты в таблицу.

## **1.5 Указания по оформлению отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать:

1) Титульный лист

2) Название лабораторной работы;

3) Цель лабораторной работы;

4) Основные теоретические сведения, касающиеся:

– видов потерь мощности и энергии в электрических сетях;

– доли потерь в линиях электропередач;

– уровень потерь в сетях различных классов напряжения в России и в мировой практике.

4) Расчетную часть, схему замещения и вывод о том, допустим ли уровень удельных потерь в линии электропередачи.

## **1.6 Контрольные вопросы**

1 Перечислите основные группы потерь электрической энергии

2 Назовите основные мероприятия по снижению уровня технических потерь электрической энергии

3 Перечислите мероприятия по совершенствованию учета электрической энергии

4 Охарактеризуйте метод оперативных расчетов нагрузочных потерь электроэнергии

5 Охарактеризуйте метод средних нагрузок для расчета нагрузочных потерь электрической энергии.

Таблица 1.2 – Исходные данные к лабораторной работе №1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Индуктивность L, Гн	0,3	0,27	0,24	0,21	0,18	0,15	0,12	0,09	0,06	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,1	0,11	0,13	0,14	0,16	0,17	0,19	0,2	0,22	0,23	0,25
Активное сопротивление R, Ом	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	95	85	75	65	55	45	35	25	15	5	10	15	20	25
Активная мощность нагрузки P, Вт	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Реактивная мощность нагрузки Q, вар	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6

## **2 Лабораторная работа №2. Уменьшение потерь активной мощности в распределительной электрической сети с односторонним питанием путем поперечной компенсации реактивной мощности нагрузки**

Цель работы: Определить потенциал снижения потерь активной мощности в распределительной электрической сети с односторонним питанием путем поперечной компенсации реактивной мощности нагрузки, оценить эффективность данного способа снижения потерь.

### **2.1 Краткие теоретические и практические сведения**

На промышленных предприятиях значительная часть электроприемников потребляет помимо активной мощности еще и реактивную. Основными потребителями реактивной мощности являются:

- асинхронные двигатели ( $\operatorname{tg} \varphi = 0,75—1,3$ );
- индукционные печи ( $\operatorname{tg} \varphi = 1—2,7$ );
- вентильные преобразователи ( $\operatorname{tg} \varphi = 0,75—1,2$ );
- сварочные агрегаты ( $\operatorname{tg} \varphi = 1,5—2,7$ ).

Кроме того, часть реактивной мощности теряется при ее передаче в элементах электрических сетей.

Передача реактивной мощности от источника к потребителям требует увеличения сечений проводов и кабелей, повышения мощности силовых трансформаторов и сопровождается потерями активной мощности. Загрузка линий и трансформаторов реактивной мощностью вызывает увеличение потерь напряжения, что может приводить к существенным отклонениям напряжения от номинального значения, что в свою очередь, ухудшает режим работы потребителей электрической энергии.

При этом реактивная мощность играет важную роль в поддержании необходимого уровня напряжения в электрической сети. Недостаток реактивной

мощности в узле нагрузки ведет к уменьшению напряжения в этом узле и связанным с этим негативным эффектам.

Для некоторых потребителей, таких как асинхронные двигатели, снижение питающего напряжения ведет к увеличению потребления реактивной мощности и к еще большему снижению напряжения. Возникает так называемая «лавина напряжения».

Избыточная величина реактивной мощности в узле нагрузки ведет к увеличению напряжения что приводит к резкому снижению срока службы изоляции и некоторых типов электроприборов (например ламп освещения).

Проблемы, обусловленные перечисленными факторами, можно решить если осуществлять генерацию реактивной мощности непосредственно на месте ее потребления. Такой подход принято называть компенсацией реактивной мощности.

Компенсация реактивной мощности – выработка реактивной мощности в сети промышленного предприятия (непосредственно у приемника). Задача компенсации реактивной мощности заключается в определении типа, мощности и места установки (присоединения к сети) источника реактивной мощности.

Кроме того, требуется установить оптимальное соотношение между источниками реактивной мощности на сторонах низкого и высокого напряжений, принимая во внимание потери электроэнергии на генерацию реактивной мощности источниками низкого и высокого напряжений, потери электроэнергии на передачу из сети ВН в сеть НН и удорожание трансформаторных подстанций в случае загрузки их реактивной мощностью.

Решение задачи компенсации реактивной мощности выполняется на основе сравнения технико-экономических показателей различных вариантов.

Различают продольную и поперечную, а также групповую, индивидуальную и централизованную компенсацию реактивной мощности.

Продольная компенсация применяется для уменьшения реактивного сопротивления ЛЭП. Компенсация обеспечивается последовательным включением в рассечку ЛЭП емкостного сопротивления в виде конденсаторов.

Поперечная компенсация применяется для уменьшения перетоков реактивной мощности в сети. Батареи конденсаторов в этом случае подключают на шины 6-10 кВ подстанций параллельно нагрузке. Это приводит к уменьшению потерь мощности и напряжения во всей сети до точки подключения источника реактивной мощности (ИРМ).

При индивидуальной компенсации ИРМ подключаются прямо к месту потребления реактивной мощности: к асинхронному двигателю, к газоразрядной лампе, к сварочному аппарату, для индукционной печи, для трансформатора и т.д. В таком случае от реактивных токов разгружается вся вышестоящая сеть. С технической точки зрения индивидуальная компенсация реактивной мощности является наиболее выгодной, так как позволяет минимизировать путь протекания потока реактивной мощности. Но с экономической точки зрения установка большого количества ИРМ малой мощности в большинстве случаев является дорогостоящим и нецелесообразным мероприятием.

Групповая компенсация подразумевает подключение одного общего ИРМ сразу к нескольким потребителям со значительными индуктивными составляющими. В этом случае постоянная одновременная работа нескольких потребителей сопряжена с циркуляцией общей реактивной энергии между потребителями и ИРМ. Линия, питающая группу потребителей, окажется разгружена.

Централизованная компенсация предполагает установку ИРМ с регулятором в главном или групповом распределительном щите. Регулятор оценивает в режиме реального времени текущее потребление реактивной мощности, и оперативно подключает и отключает необходимое количество конденсаторов. В итоге потребляемая от сети суммарная мощность всегда сводится к минимуму в соответствии с мгновенной величиной требуемой реактивной мощности.

## **2.2 Описание лабораторной установки**

Экспериментальная часть лабораторной работы выполняется на стенде «Энергосбережение в системах электроснабжения», состоящем из двух частей

(рисунок 1.2 и рисунок 1.3). Для выполнения данной лабораторной работы потребуются блоки, указанные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Перечень аппаратуры, используемой в эксперименте

Обозначение на схеме	Наименование	Номер блока
G1	Однофазный источник питания	218.5
A1	Автоматический однополюсный выключатель	359
A2	Однофазный трансформатор	372.1
A3	Модель линии электропередачи	313.3
A4	Активная нагрузка	306.4
A6	Индуктивная нагрузка	324.4
A9	Емкостная нагрузка	317.3
A18	Переключатель	2306
P1	Блок мультиметров	509.2
P2	Измеритель мощностей	507.3

### 2.3 Указания по проведению эксперимента на стенде

1 Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2 Соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" однофазного источника питания G1.

3 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рисунок 2.1).

4 Отключите (если включен) выключатель A1.

5 Переключатель A18 установите в положение I.

6 Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A2, например, равным 1.

7 Установите переключателями желаемые параметры модели линии электропередачи A3, например, равными 50 Ом и 0,15 Гн.

8 Установите переключателями желаемые параметры нагрузок A4 и A6, например, равными 50%.

9 Включите источник G1.

10 Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и измерителя мощностей P2.

11 Активизируйте используемые мультиметры.

12 Включите выключатель A1.

13 С помощью мультиметров, включенных как вольтметры, блока P1 контролируйте напряжения в начале и конце линии электропередачи A3.

14 Меняя переключателем величину мощности QK емкостной нагрузки A9, с помощью измерителя P2 измеряйте активную P и реактивную Q мощности в начале линии электропередачи A3 (при положении I переключателя A18), а также потери активной мощности ΔP в ней (при положении переключателя A18, противоположном I) и заносите их в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Таблица для заполнения

Q <sub>к</sub> , вар										
ΔP, Вт										
P, Вт										
Q, ВАр										

15 По завершении эксперимента отключите источник G1, выключатели «СЕТЬ» измерителя мощностей P2 и блока мультиметров P1.

16 Для каждого значения мощности QK емкостной нагрузки A9 определите удельные потери Δp в линии электропередачи A3 по формуле:

$$\Delta p = \frac{\Delta P}{P} 100\% , \quad (2.1)$$

и занесите их в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Таблица для заполнения

Q <sub>к</sub> , %										
Δp, %										

17 Используя результаты таблиц 2.1 и 2.2, постройте зависимости  $\Delta p = f(QK)$ ,  $\Delta p = f(Q)$ .

18 Сделайте выводы о влиянии компенсации реактивной мощности нагрузки на потери активной мощности в линии электропередачи распределительной электрической сети и о возможности уменьшения этих потерь.

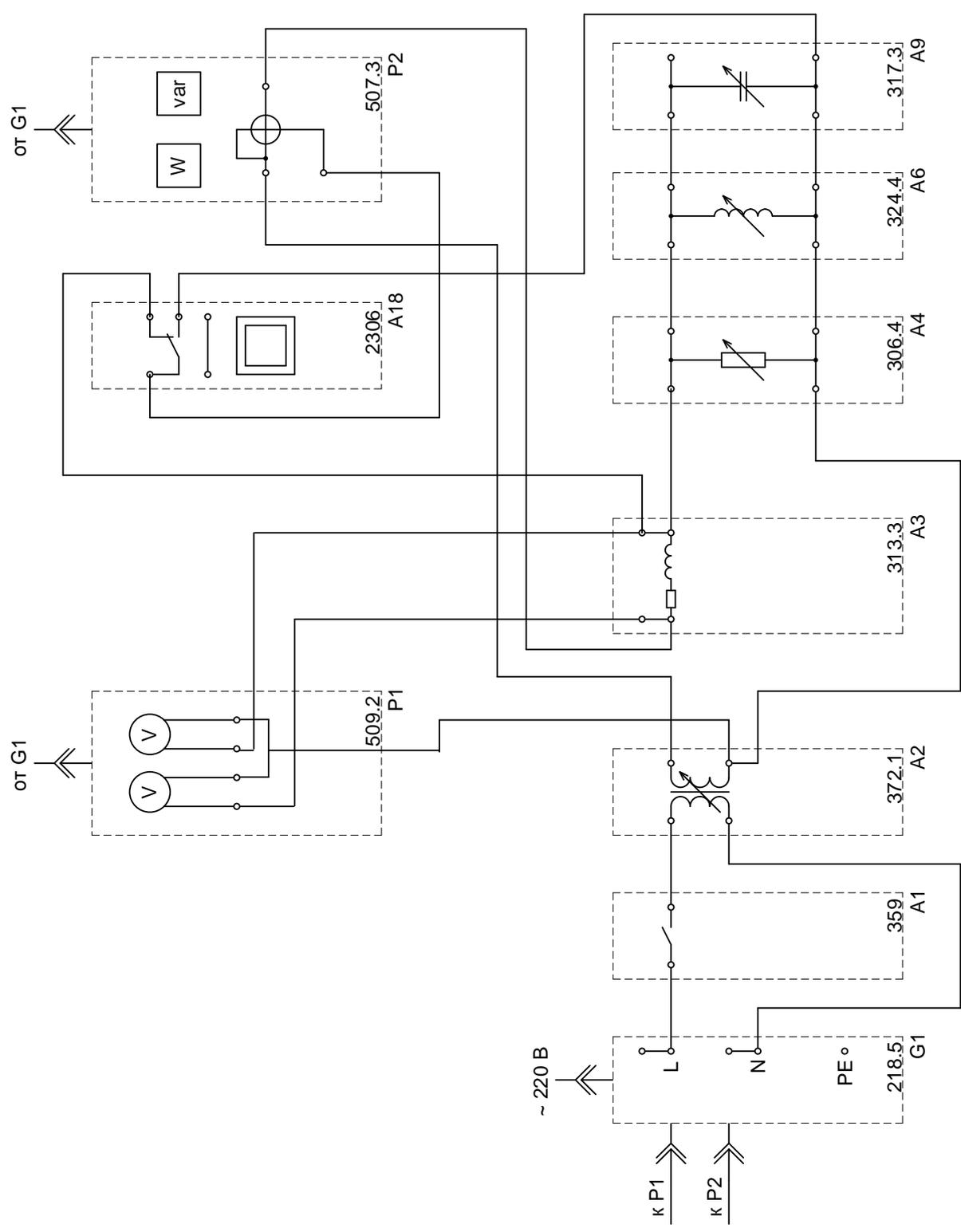


Рисунок 2.1 – Электрическая схема соединений

## 2.4 Указания по выполнению лабораторной работы в теоретическом формате по вариантам

Исходными данными являются параметры линии, представленные в таблице 2.4.

1 Определите индуктивное сопротивление линии согласно варианту:

$$X_{л} = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, \quad (2.2)$$

где  $\omega$  – циклическая частота переменного тока (рад/с);

$L$  – индуктивность (Гн);

$f$  – частота электрического тока (Гц)

2 Определите потери активной и реактивной мощности в линии в зависимости от степени регулирования мощности компенсирующей установки  $Q_{куi}$  (значения взять из таблицы 2.4)

$$\Delta P_{л} = \frac{P_{н}^2 + (Q_{н} - Q_{куi})^2}{U^2} R_{л}, \quad (2.3)$$

$$\Delta Q_{л} = \frac{P_{н}^2 + (Q_{н} - Q_{куi})^2}{U^2} X_{л}, \quad (2.4)$$

где  $P_{н}$  – активная мощность нагрузки, Вт;

$Q_{н}$  – реактивная мощность нагрузки, Вт;

$U$  – напряжение, В;

$R_{л}$  – активное сопротивление линии, Ом;

$X_{л}$  – индуктивное сопротивление линии, Ом;

3 Определите искомые удельные потери  $\Delta p$  в линии электропередачи по формуле:

$$\Delta p = \frac{\Delta P}{P} 100\% , \quad (2.5)$$

4 Сведите полученные результаты в таблицы 2.2 и 2.3.

5 Используя результаты таблиц 2.2 и 2.3, постройте зависимости  $\Delta p = f(Q_k)$ ,  $\Delta p = f(Q)$ .

6 Сделайте выводы о влиянии компенсации реактивной мощности нагрузки на потери активной мощности в линии электропередачи распределительной электрической сети и о возможности уменьшения этих потерь.

## **2.5 Указания по оформлению отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать:

- 1) Титульный лист
- 2) Название лабораторной работы;
- 3) Цель лабораторной работы;
- 4) Основные теоретические сведения, касающиеся:
  - видов компенсации реактивной мощности;
  - преимуществ и недостатков, особенностей применения КУ;
- 5) Расчетную часть, схему замещения, вывод о влиянии значения реактивной мощности на уровень потерь

## **2.6 Контрольные вопросы**

- 1 В чем заключается физический смысл реактивной мощности
- 2 К каким негативным эффектам приводят большие перетоки реактивной мощности по линиям электропередач?
- 3 Назовите основные источники реактивной мощности, используемые для целей компенсации.
- 4 Назовите основные виды компенсации реактивной мощности.

Таблица 2.4 – Исходные данные к лабораторной работе №2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
Индуктивность L, Гн	0,3	0,27	0,24	0,21	0,18	0,15	0,12	0,09	0,06	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,1	0,11	0,13	0,14	0,16	0,17	0,19	0,2	0,22	0,23	0,25		
Активное сопротивление R, Ом	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	95	85	75	65	55	45	35	25	15	5	10	15	20	25		
Активная мощность нагрузки P, Вт	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
Реактивная мощность нагрузки Q, вар	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
Мощность КУ на i ступени регулирования, вар																											
Qк1	14	10	8	6	8	6	12	10	6	8	10	4	6	8	10	2	4	6	8	6	12	4	6	8	14		
Qк2	16	12	10	8	10	8	14	12	8	10	12	6	8	10	12	4	6	8	10	8	14	6	8	10	16		
Qк3	18	14	12	10	12	10	16	14	10	12	14	8	10	12	14	6	8	10	12	10	16	8	10	12	18		
Qк4	20	16	14	12	14	12	18	16	12	14	16	10	12	14	16	8	10	12	14	12	18	10	12	14	20		
Qк5	22	18	16	14	16	14	20	18	14	16	18	12	14	16	18	10	12	14	16	14	20	12	14	16	22		
Qк6	24	20	18	16	18	16	22	20	16	18	20	14	16	18	20	12	14	16	18	16	22	14	16	18	24		
Qк7	26	22	20	18	20	18	24	22	18	20	22	16	18	20	22	14	16	18	20	18	24	16	18	20	26		
Qк8	30	24	22	20	22	20	26	24	20	22	24	18	20	22	24	16	18	20	22	20	26	18	20	22	30		
Qк9	32	26	24	22	24	22	28	26	22	24	26	20	22	24	26	18	20	22	24	22	28	20	22	24	32		
Qк10	34	28	26	24	26	24	30	28	24	26	28	22	24	26	28	20	22	24	26	24	30	22	24	26	34		
Qк11	36	30	28	26	28	26	32	30	26	28	30	24	26	28	30	22	24	26	28	26	32	24	26	28	36		
Qк12	38	32	30	28	30	28	34	32	28	30	32	26	28	30	32	24	26	28	30	28	34	26	28	30	38		

### **3 Лабораторная работа №3. Уменьшение потерь активной мощности в распределительной электрической сети с двусторонним питанием путем регулирования напряжения**

Цель работы: определить потенциал снижения потерь активной мощности в распределительной электрической сети с двусторонним питанием путем регулирования напряжения, оценить эффективность данного способа снижения потерь.

#### **3.1 Краткие теоретические и практические сведения**

Напряжение в узловых точках – важнейший показатель режима электроэнергетической системы (ЭЭС), непосредственно влияющий на качество электрической энергии, надежность электроснабжения потребителей и экономичность работы ЭЭС.

Нагрузка большинства потребителей непрерывно изменяется в течение суток и года. Изменение нагрузки приводит к изменению потерь напряжения в сетях и отклонению напряжения у приемников электрической энергии. Изменение напряжения относительно номинального значения  $U_{\text{ном}}$  оказывает неблагоприятное влияние на режимы работы, производительность и технико-экономические показатели всех элементов электрической системы. Например, у бытовых нагревательных приборов нагревательные элементы состоят из активных сопротивлений. Снижение напряжения сети вызывает резкое уменьшение мощности, отдаваемой нагревательным прибором. Другим примером является работа асинхронного двигателя, электромагнитный которого пропорционален квадрату напряжения сети:  $M \equiv U_1^2$ . Это в значительной степени отражается на эксплуатационных свойствах двигателя: даже небольшое снижение напряжения сети вызывает заметное уменьшение вращающего момента асинхронного двигателя. Например, при уменьшении напряжения сети на 10% относительно номинального ( $U_1 = 0.9U_{\text{ном}}$ ) электромагнитный момент двигателя уменьшается на 19%.

Требования к качеству электрической энергии нормируют ряд показателей режима напряжений, характеризующих его изменения. С этими показателями можно подробно ознакомиться в ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (введен взамен ГОСТ 13109-97, 54149-2010).

Согласно ГОСТ 32144-2013, положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10% номинального или согласованного значения напряжения в течение 100% времени интервала в одну неделю.

При регулировании напряжения в электрических сетях должны быть обеспечены:

- соответствие показателей напряжения требованиям государственного стандарта;

- соответствие уровня напряжения значениям, допустимым для оборудования электрических станций и сетей с учетом допустимых эксплуатационных повышений напряжения промышленной частоты на электрооборудовании (в соответствии с данными заводов-изготовителей и циркуляров). Дело в том, что запас изоляции сетей до 220 кВ рассчитан на превышение напряжения только на 15%; сети до 330 кВ – на 10%, а сети до 500 кВ – на 5%. Особенно это важно в сетях 0,4; 10; 35; 110; 220 кВ, так как эти сети очень разветвлённые;

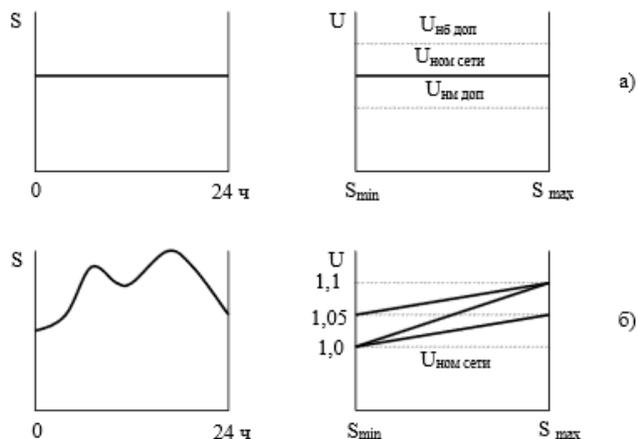
- необходимый запас устойчивости энергосистем;

- минимум потерь электроэнергии в электрических сетях.

Существует 2 способа регулирования напряжения: стабилизация и встречное регулирование. Эти способы выбираются по характеру подключенных к сети потребителей и их удаленности от центра питания.

Стабилизацию напряжения в основном применяют тогда, когда к центральному питанию подключены предприятия промышленного характера с 3-х сменным характером работы, имеющие стабильный график нагрузки с числом часов

использования максимума нагрузки  $T_M \geq 5500-6000$ ч. Напряжение в течение суток должно меняться незначительно.



а-стабилизация; б- встречное регулирование

Рисунок 3.1 –Регулирование напряжения

Встречное регулирование чаще применяют для смешанной нагрузки, коммунально-бытовой и 1-2-х сменных предприятий небольшой мощности с  $T_M \leq 5500$  ч, но при уменьшении  $T_M$ , к точности регулирования начинают предъявляться более высокие требования. Так как у таких потребителей график нагрузки имеет явно выраженный пик, то напряжение в момент достижения максимальной нагрузки будет снижаться до минимальной величины. Чтобы обеспечить требуемый уровень напряжения на нагрузке, необходимо в центре питания с помощью РПН увеличить напряжение. В режиме встречного регулирования может возникнуть проблема, обусловленная несовпадением пиков нагрузки у разных потребителей. В этом случае требуется регулировать напряжение у группы потребителей с схожим графиком или осуществлять регулирование по результирующему графику [4].

Для стабилизации напряжения в электрических системах используются следующие подходы:

- централизованное регулирование, когда воздействие оказывается на большое количество узлов сети. Такое регулирование осуществляется генераторами и трансформаторами ОРУ электростанций, трансформаторами крупных системных и районных подстанций, синхронными компенсаторами. При централизованном

регулировании напряжения в сети в центрах питания (ЦП) изменяют  $k_{тр}$  трансформаторов. При этом напряжение на отправном конце может достигнуть наибольшего рабочего значения, а на зажимах потребителя оставаться недопустимо низким. В этом случае помимо централизованного необходимо также местное регулирование  $k_{тр}$  ;

– местное регулирование используется в случаях, когда централизованного регулирования оказывается недостаточно для поддержания напряжения в требуемом диапазоне во всех узлах. Такое регулирование осуществляется трансформаторами понижающих подстанций, вольтодобавочными трансформаторами и батареями статических конденсаторов;

– смешанное регулирование, использующее оба принципа.

В лабораторной работе рассматривается регулирование напряжения с помощью изменения коэффициента трансформации, так как это наиболее распространенный метод регулирования напряжения на шинах потребителей [5]. Изменение коэффициента трансформации трансформаторов и автотрансформаторов под нагрузкой производят при наличии встроенного устройства для регулирования напряжения (РПН).

При отсутствии РПН возможно сезонное регулирование коэффициента трансформации с помощью устройства ПБВ (переключения без возбуждения). Другое название устройства ПБВ – анцапфа. Коэффициент трансформации для трансформаторов с ПБВ изменяется в пределах  $\pm 2 \cdot 2.5 \%$ , для РПН регулировочный диапазон может достигать  $\pm 16\%$ , а для регулировочных трансформаторов  $\pm 25\%$ . Выбор исходных положений для регулирования напряжения во многом зависит от местных условий, типа сети, состава электроприемников и т. п.

### **3.2 Описание лабораторной установки**

Экспериментальная часть лабораторной работы выполняется на стенде «Энергосбережение в системах электроснабжения», состоящем из двух частей (Рисунок 1.2 и 1.3). Для выполнения данной лабораторной работы потребуются блоки, указанные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Перечень аппаратуры, используемой в эксперименте

Обозначение на схеме	Наименование	Номер блока
G1	Однофазный источник питания	218.5
A1	Автоматический однополюсный выключатель	359
A2, A10	Однофазный трансформатор	372.1
A3, A11	Модель линии электропередачи	313.3
A4, A5	Активная нагрузка	306.4
A6, A7	Индуктивная нагрузка	324.4
A8	Коммутатор измерителя мощностей	349
A18	Переключатель	2306
A21	Регулируемый автотрансформатор	318.2
P1	Блок мультиметров	509.2
P2	Измеритель мощностей	507.3

### 3.3 Указания по проведению эксперимента на стенде

1 Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2 Соедините гнезда защитного заземления "" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1.

3 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рисунок 3.2).

4 Отключите (если включен) выключатель A1.

5 Переключатель A18 установите в положение I.

6 Установите переключателями значение коэффициента трансформации трансформаторов A2 и A10 равным 1.

7 Установите переключателями желаемые параметры модели линий электропередачи A3 и A11, например, равными 50 Ом и 0,15 Гн.

8 Установите переключателями желаемые параметры нагрузок A4, A5 и A6, A7, например, равными 50%.

9 Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора A21 против часовой стрелки до упора.

10 Включите источник G1.

11 Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1, автотрансформатора A21 и измерителя мощностей P2.

12 Активизируйте используемые мультиметры.

13 Регулируя выходное напряжение автотрансформатора A21 выставьте напряжение U2 трансформатора A10, например, меньше напряжения U1 трансформатора A2 на 5 %.

14 Включите выключатель A1.

15 Регулируя напряжения путем изменения коэффициентов трансформации трансформаторов A3, A10, с помощью измерителя P2 измеряйте потоки мощности P1 и P2 в линиях электропередачи A3 и A11 (при положениях 1 и 2 переключателя коммутатора A8 и положении I переключателя A18), величины потерь активной мощности  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$  в тех же линиях электропередачи (при положениях 1 и 2 переключателя коммутатора A8 и положении противоположном I переключателя A18), а также с помощью мультиметров блока P1 измеряйте напряжения U1 и U2 трансформаторов A2 и A10.

16 По завершении эксперимента отключите источник G1, выключатели «СЕТЬ» измерителя мощностей P2, автотрансформатора A21 и блока мультиметров P1.

17 Для каждой пары установленных коэффициентов трансформации определяйте удельные потери  $\Delta p$  в линиях электропередач A3 и A11 по формуле

$$\Delta p = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{P_1 + P_2} 100\% \quad (3.1)$$

18 На основании полученных результатов сделайте выводы о влиянии регулирования напряжения на потери активной мощности в линиях электропередачи распределительной электрической сети и о возможности уменьшения этих потерь.

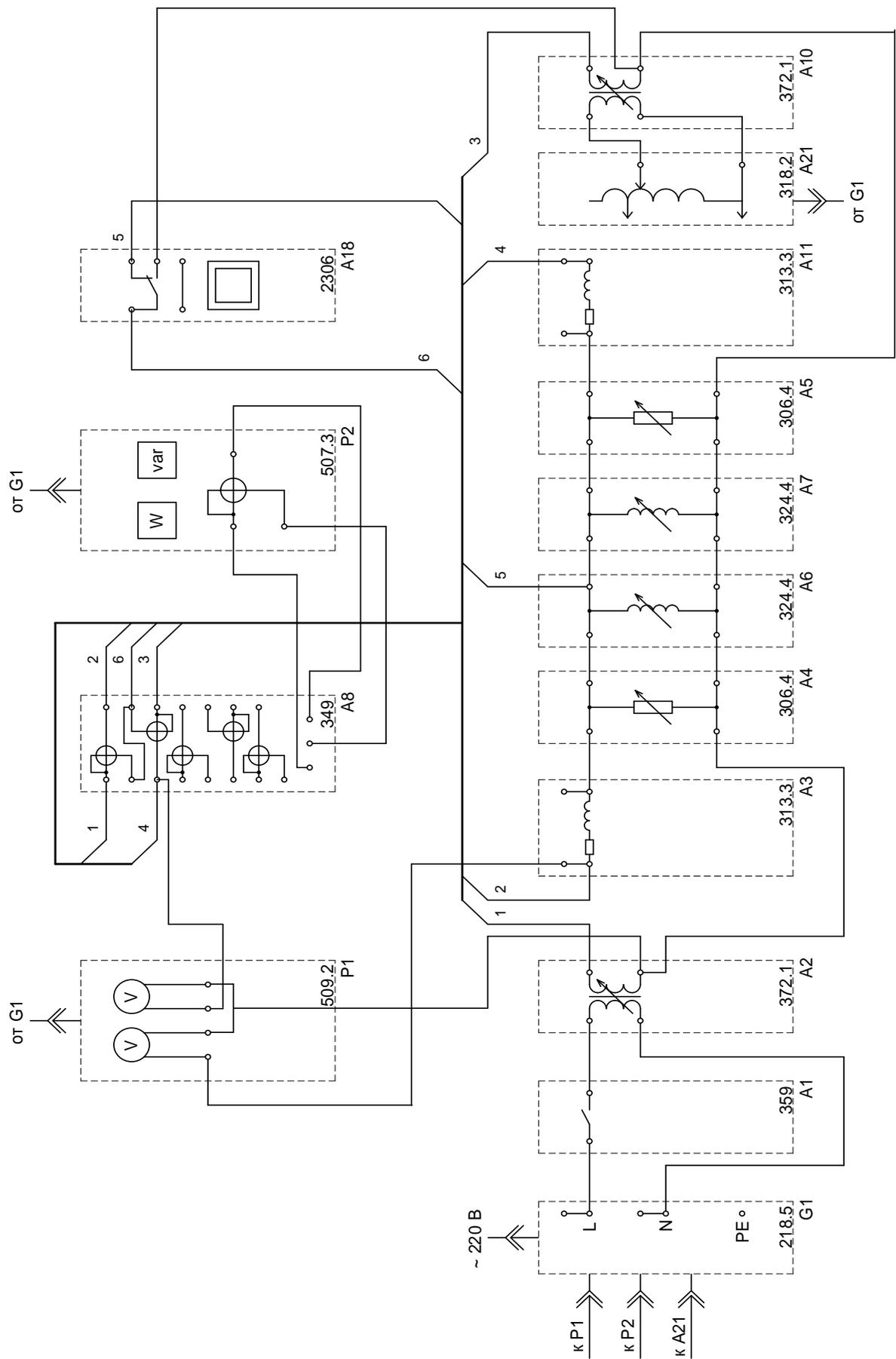


Рисунок 3.2 – Электрическая схема соединений

### 3.4 Указания по выполнению лабораторной работы в теоретическом формате по вариантам

Исходными данными являются параметры линии, представленные в таблице 3.2.

1 Определите индуктивное сопротивление линии согласно варианту:

$$X_{л} = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, \quad (3.2)$$

где  $\omega$  – циклическая частота переменного тока (рад/с);

$L$  – индуктивность (Гн);

$f$  – частота электрического тока (Гц)

2 Определите значение напряжения на низкой стороне трансформаторов 1 и 2 с учетом коэффициента трансформации согласно варианту:

$$U_{тр.вых} = \frac{U_{тр.вх}}{k}, \quad (3.3)$$

3 Определите потери активной и реактивной мощности в линии с учетом напряжения на питающем трансформаторе. Для упрощения считается, что точка потокораздела находится в точке 5 (рисунок 3.2). Параметры нагрузки 1 и 2, а также параметры линий электропередачи 1 и 2 считать одинаковыми и взять из таблицы 3.2 согласно варианту.

$$\Delta P_{л1} = \frac{(P_{н1}^2 + Q_{н1}^2)}{2} \frac{R_{л1}}{U_{тр.вых1}^2}, \quad (3.4)$$

$$\Delta Q_{л1} = \frac{P_{н1}^2 + Q_{н1}^2}{2} \frac{X_{л1}}{U_{тр.вых1}^2}, \quad (3.5)$$

$$\Delta P_{л2} = \frac{P_{н2}^2 + Q_{н2}^2}{U_{тр.вых2}^2} R_{л2}, \quad (3.6)$$

$$\Delta Q_{л2} = \frac{P_{н2}^2 + Q_{н2}^2}{U_{тр.вых2}^2} X_{л2}, \quad (3.7)$$

4 Определите искомые удельные потери  $\Delta p$  в линии электропередачи по формуле:

$$\Delta p = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{P_1 + P_2} 100\%, \quad (3.8)$$

6 Сделайте выводы о влиянии коэффициента трансформации на потери активной мощности в линии электропередачи распределительной электрической сети и о возможности уменьшения этих потерь.

### 3.5 Указания по оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

- 1) Титульный лист
- 2) Название лабораторной работы;
- 3) Цель лабораторной работы;
- 4) Основные теоретические сведения, касающиеся:
  - цели и способов регулирования напряжения;
  - влияния уровня напряжения на работу как системы электроснабжения, так и отдельных электроприемников;
- 4) Расчетную часть, схему замещения, вывод о влиянии значения напряжения на уровень потерь.

### **3.6 Контрольные вопросы**

- 1 Каким образом снижение уровня напряжения влияет на основные типы электроприемников?
- 2 Назовите основные способы регулирования напряжения в электрической сети.
- 3 В чем заключается суть встречного регулирования напряжения?
- 4 В чем заключается отличие устройства РПН и устройства ПБВ?

Таблица 3.2 – Исходные данные к лабораторной работе №3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Индуктивность $L$ , Гн	0,3	0,27	0,24	0,21	0,18	0,15	0,12	0,09	0,06	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,1	0,11	0,13	0,14	0,16	0,17	0,19	0,2	0,22	0,23	0,25
Активное сопротивление $R$ , Ом	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	95	85	75	65	55	45	35	25	15	5	10	15	20	25
Активная мощность нагрузки $P$ , Вт	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Реактивная мощность нагрузки $Q$ , вар	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Входное напряжение первого трансформатора $U_{тр.вх1}$	239	223	229	229	203	225	224	203	202	206	229	200	219	228	199	213	213	232	230	207	208	235	209	206	234
Входное напряжение второго трансформатора $U_{тр.вх2}$	228	212	218	218	193	214	213	193	192	196	218	190	209	217	190	203	203	221	219	197	198	224	199	196	223
Коэффициент трансформации для первого трансформатора $k_1$	0,9	0,925	0,95	0,975	1	1,05	1,1	0,9	0,925	0,95	0,975	1	1,05	1,1	0,9	0,925	0,95	0,975	1	1,05	1,1	0,9	0,925	0,95	0,975
Коэффициент трансформации для второго трансформатора $k_2$	1,1	1,05	1	0,975	0,95	0,925	0,9	1,1	1,05	1	0,975	0,95	0,925	0,9	1,1	1,05	1	0,975	0,95	0,925	0,9	1,1	1,05	1	0,975

## **4 Лабораторная работа №4. Обеспечение высокого коэффициента полезного действия малонагруженного трансформатора путем отключения параллельно с ним работающего трансформатора**

Цель работы: Определить снижение потерь мощности в параллельно работающих трансформаторах при условии отключения одного из них.

### **4.1 Краткие теоретические и практические сведения**

Для преобразования электроэнергии, поступающей от источника питания к приемнику (потребителю), используются силовые трансформаторы подстанций, работа которых сопровождается потерями мощности и электроэнергии. Потери активной мощности вызваны явлением гистерезиса (циклического перемагничивания), вихревыми и циркулирующими токами, рассеиванием магнитного поля в толще магнитопровода и нагревом самого проводника. Таким образом, потери электроэнергии в трансформаторах делятся на несколько видов:

- магнитные (намагничивание сердечника);
- электрические (нагрев токоведущих частей);
- дополнительные (возникают в других элементах трансформатора).

Эти потери неизбежны, однако при неэффективной эксплуатации они могут вырасти. Основными причинами увеличения потерь в силовых трансформаторах являются:

- 1 Недогрузка трансформатора, сопровождающаяся относительным ростом потерь холостого хода;
- 2 Холостой ход трансформатора;
- 3 Неправильный выбор количества и мощности силовых трансформаторов при проектировании;
- 4 Неравномерность графиков электрической нагрузки;
- 5 Малый коэффициент мощности нагрузки ( $\cos_{\text{ср}}$ );

6 Низкое качество трансформируемой энергии.

В периоды недогрузки трансформатора, характеризующегося снижением коэффициент загрузки трансформатора  $K_{зт}$ , уменьшается коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора  $\eta_T$  (рисунок 4.1).

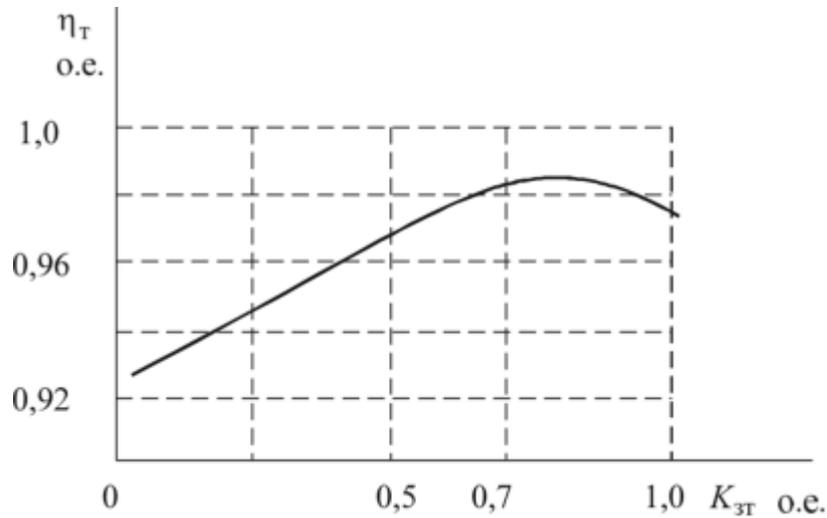


Рисунок 4.1 – Зависимость КПД трансформатора от коэффициента его загрузки:

Аналогичное утверждение справедливо и при снижении коэффициента мощности нагрузки  $\cos\varphi_{нагр}$  (рисунок 4.2).

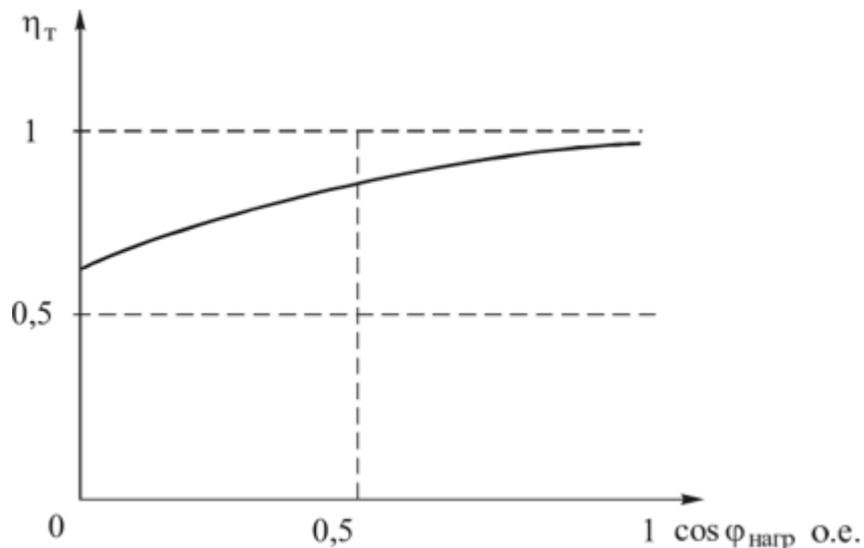
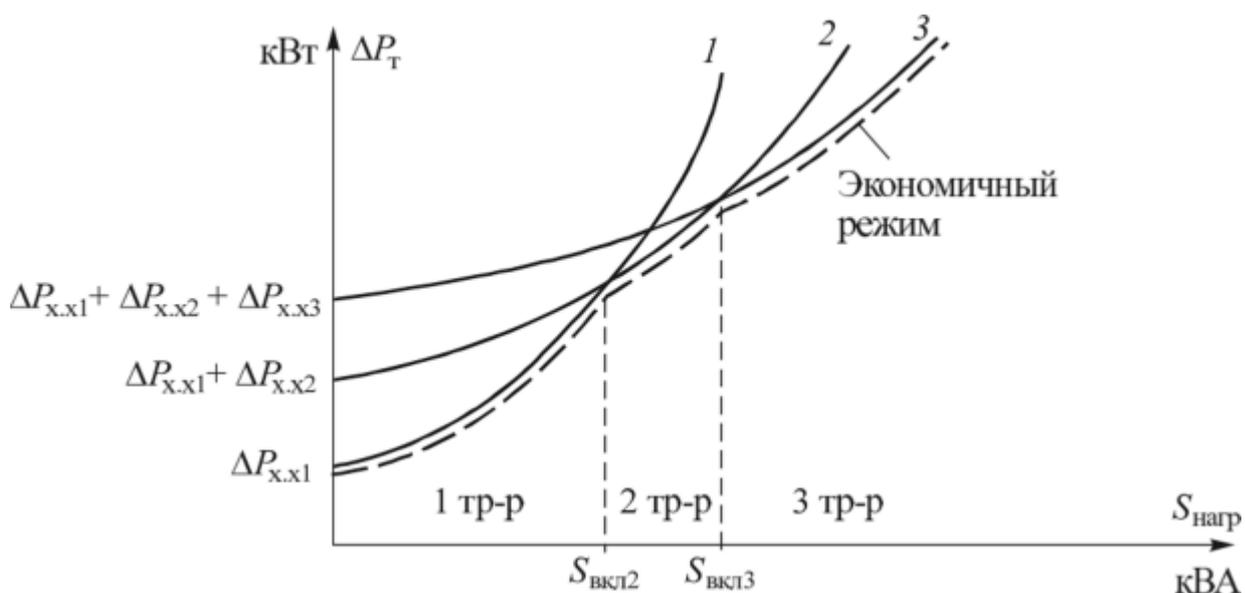


Рисунок 4.2 – Зависимость КПД трансформатора от коэффициента мощности нагрузки:

Для обеспечения экономичного режима работы трансформаторных подстанций используются следующие способы снижения потерь [5]:

- оперативное управление количеством работающих трансформаторов с учетом суточных, месячных и сезонных колебаний нагрузки. Экономическая целесообразность рассчитывается на основе стоимости сохраненной энергии и сработанного коммутационного ресурса высоковольтных выключателей со стороны питающей трансформатор линии электропередачи (рисунок 4.3);

- обеспечение взаимного резервирования силовых трансформаторов на однострансформаторных подстанциях со стороны низкого напряжения. Это дает возможность отключить малозагруженный трансформатор, обеспечивая его нагрузку электроэнергией после включения резервной линии.



$\Delta P_T$  - потери активной мощности в трансформаторах;  $S_{нагр}$  - полная мощность нагрузки цеха; 1, 2, 3 - работают один, два или три трансформатора соответственно;  $S_{вкл}$  - мощности нагрузки, при которых необходимо включение еще одного трансформатора

Рисунок 4.3 – Оперативное управление количеством работающих трансформаторов

При использовании в эксплуатации экономически целесообразного режима работы трансформаторов с целью экономии электроэнергии следует исходить из следующих положений:

1. Не должна снижаться надежность электроснабжения потребителей.
2. Трансформаторы должны снабжаться устройством автоматического ввода резерва (АВР).
3. Целесообразно автоматизировать операции отключения и включения трансформаторов, однако, для сокращения числа оперативных переключений рекомендуется отключать трансформаторы не более 3 раз в сутки.

#### **4.2 Описание лабораторной установки**

Экспериментальная часть лабораторной работы выполняется на стенде «Энергосбережение в системах электроснабжения», состоящем из двух частей (Рисунок 1.2 и 1.3). Для выполнения данной лабораторной работы потребуются блоки, указанные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Перечень аппаратуры, используемой в эксперименте

Обозначение на схеме	Наименование	Номер блока
G1	Однофазный источник питания	218.5
A1	Автоматический однополюсный выключатель	359
A2, A10	Однофазный трансформатор	372.1
A4, A5	Активная нагрузка	306.4
A6, A7	Индуктивная нагрузка	324.4
A8	Коммутатор измерителя мощностей	349
P2	Измеритель мощностей	507.3

#### **4.3 Указания по проведению эксперимента на стенде**

- 1 Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- 2 Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1.

- 3 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рисунок 4.1).
- 4 Отключите (если включен) выключатель А1.
- 5 Переключатель коммутатора А8 установите в положение 1.
- 6 Установите переключателями желаемые одинаковые значения коэффициентов трансформации трансформаторов А2 и А10, например, равным 1.
- 7 Установите переключателями желаемые параметры нагрузок А4...А7, например, равными 50%.
- 8 Включите источник G1.
- 9 Включите выключатель «СЕТЬ» измерителя мощностей P2.
- 10 Включите выключатель А1.
- 11 При положениях 1 и 2 переключателя коммутатора А8, с помощью измерителя P2 измерьте величины активной мощности P1 и P2 соответственно до и после исследуемого трансформатора А2.
- 12 Отключите трансформатор А10 вынув проводник из гнезда 1 нагрузки А7.
- 13 Вновь измерьте величины активной мощности P1 и P2 соответственно до и после исследуемого трансформатора А2.
- 14 По завершении эксперимента отключите источник G1, выключатели «СЕТЬ» измерителя мощностей P2 и блока мультиметров P1.
- 15 Используя данные двух серий измерений, определите коэффициенты полезного действия  $\eta$  трансформатора А2 по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% , \quad (4.1)$$

- 16 На основании сравнения полученных результатов сделайте вывод о влиянии отключения параллельно работающего трансформатора на коэффициент полезного действия оставшегося в работе трансформатора.



#### 4.4 Указания по выполнению лабораторной работы в теоретическом формате по вариантам

Исходными данными являются параметры линии, представленные в таблице 4.2.

1 Определите суммарные потери холостого хода при параллельной работе двух трансформаторов:

$$\Delta P_{m1+2} = \Delta P_{xx_{mp1}} + \Delta P_{xx_{mp2}}, \quad (4.2)$$

2 Определите потери короткого замыкания при параллельной работе двух трансформаторов:

$$\Delta P_{\kappa1+2} = \Delta P_{\kappa_{mp1}} \left( \frac{S_{H1}}{S_{НОМ_{mp1}}} \right)^2 + \Delta P_{\kappa_{mp2}} \left( \frac{S_{H2}}{S_{НОМ_{mp2}}} \right)^2, \quad (4.3)$$

3 Определите значения потерь после отключения одного из трансформаторов:

$$\Delta P_{m1} = \Delta P_{xx_{mp1}}, \quad (4.4)$$

$$\Delta P_{\kappa1} = \Delta P_{\kappa_{mp1}} \left( \frac{S_{H1} + S_{H2}}{S_{НОМ_{mp1}}} \right)^2, \quad (4.5)$$

4 Математически определите разницу между вариантами с одним и с двумя параллельно работающими трансформаторами:

$$\Delta P_{m1+2} + \Delta P_{\kappa1+2} - \Delta P_{m1} - \Delta P_{\kappa1}, \quad (4.6)$$

5 Выполните расчет согласно вариантам.

б Сделайте выводы о влиянии отключения одного из параллельно работающих трансформаторов на потери.

#### **4.5 Указания по оформлению отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать:

- 1) Титульный лист
- 2) Название лабораторной работы;
- 3) Цель лабораторной работы;
- 4) Основные теоретические сведения, касающиеся:
  - причин потерь электроэнергии в силовых трансформаторах;
  - способов сокращения потерь электроэнергии в трансформаторах;
- 5) Расчетную часть и вывод о влиянии числа параллельно работающих трансформаторов и коэффициента нагрузки на уровень потерь и коэффициент полезного действия.

#### **4.6 Контрольные вопросы**

- 1 Назовите основные причины потерь электрической энергии в трансформаторах.
- 2 Как КПД трансформатора зависит от его нагрузки?
- 3 Как КПД трансформатора зависит от коэффициента мощности подключенной нагрузки?
- 4 Назовите основные способы обеспечения экономичного режима работы трансформаторной подстанции.

Таблица 4.2 – Исходные данные к лабораторной работе 4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Мощность тр-ра №1, МВА	25	40	10	16	63	100	160	25	16	10
Мощность тр-ра №2, МВА	25	40	10	16	63	100	160	25	16	10
Напряжение ВН, кВ	110	110	110	110	110	110	110	35	35	35
Напряжение НН, кВ	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Загрузка тр-ра №1, %	40	50	45	35	30	55	35	40	45	50
Загрузка тр-ра №2, %	45	55	45	45	50	60	50	50	55	60

## **5 Лабораторная работа № 5. Обеспечение высоких коэффициента полезного действия и коэффициента мощности мало нагруженного асинхронного двигателя путем переключения его обмоток со схемы «треугольник» на схему «звезда»**

Цель работы: определить схему соединения обмоток малонагруженного асинхронного двигателя, при которой обеспечивается наибольший коэффициент полезного действия.

### **5.1 Краткие теоретические и практические сведения**

В мало нагруженных двигателях возникают дополнительные потери, связанные с ростом потерь холостого хода при снижении коэффициента загрузки, уменьшением величины коэффициента полезного действия и возрастанием полного тока за счет его реактивной составляющей.

Загрузка двигателя может уменьшиться в результате изменения технологического процесса при производстве новой продукции. Также двигатель может оказаться малонагруженным в результате замены, когда используется новый двигатель с большей номинальной мощностью, чем вышедший из строя. Другая причина может заключаться в ошибке на стадии проектирования: неправильная организация производственного или технологического процесса.

Анализ формулы для расчета коэффициента полезного действия и практика эксплуатации двигателей показывают, что при коэффициентах загрузки электродвигателя от 0,65 до 0,7 о.е. он имеет наибольшие значения КПД и коэффициента мощности (рисунки 5.1 и 5.2).

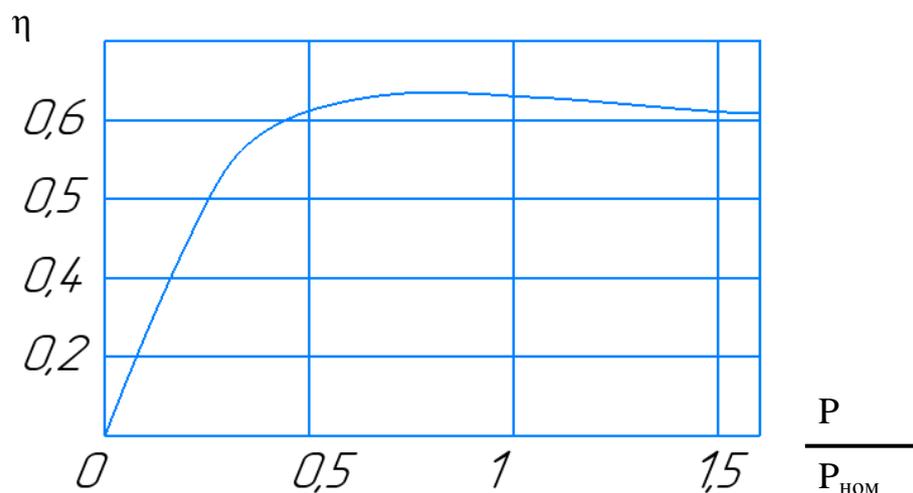


Рисунок 5.1 – Зависимость КПД асинхронного двигателя от его загрузки

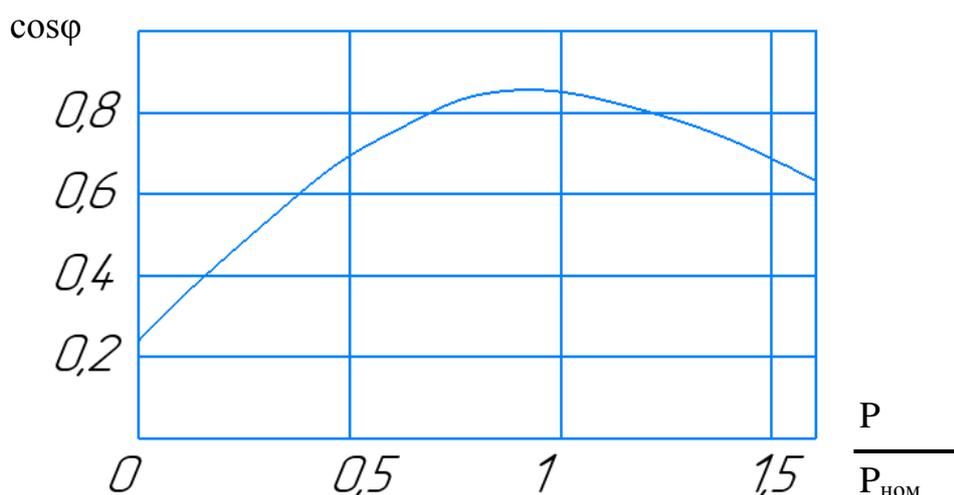


Рисунок 5.2 – Зависимость коэффициента мощности асинхронного двигателя от его загрузки

При малой загрузке двигателя (до 45 %) замена его менее мощным может производиться без дополнительной проверки. При загрузке более чем на 70% замена не требуется. А при загрузке в диапазоне от 45% до 70% необходимо технико-экономическое обоснование, включающее в себя определение потерь мощности в системе электроснабжения и в двигателе до и после замены.

Другим способом решения задачи уменьшения потерь при малой нагрузке двигателя является изменение схемы соединения обмоток статора асинхронного двигателя.

Для соединения обмоток двигателя по схеме «звезда» все концы фаз подключаются электрически в одну точку, а все начала фаз присоединяются к фазам сети. При схеме соединения «звезда» линейные токи и фазные токи равны, а между фазными и линейными напряжениями существует соотношение  $U_{\phi} = U_{\text{лин}}/\sqrt{3}$ .

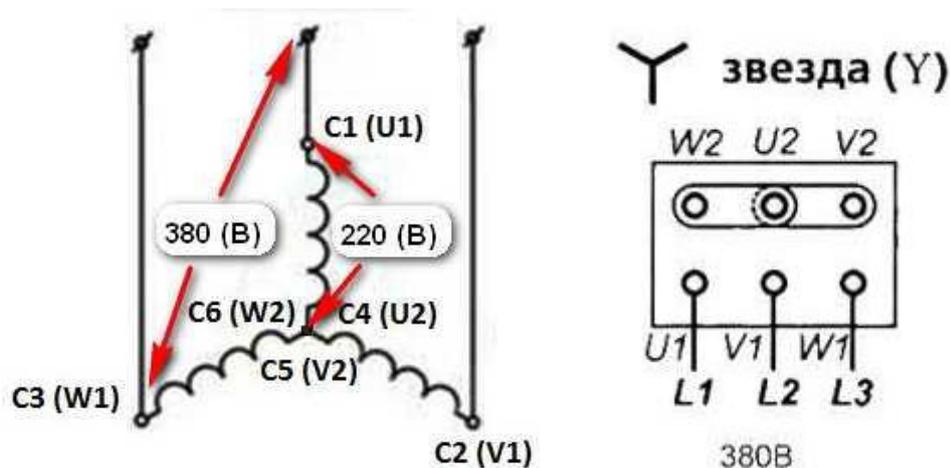


Рисунок 5.3 – Схема соединения обмоток «звезда» [7]

Преимущество соединения по схеме звезды:

- 1) Более плавный пуск асинхронного двигателя.
- 2) Устойчивый и длительный безостановочный режим работы двигателя, работа с заявленной в паспорте номинальной мощностью.
- 3) Электродвигатель будет иметь нормальный рабочий режим при различных ситуациях: при высоких кратковременных перегрузках, при длительных незначительных перегрузках;
- 4) При эксплуатации корпус электродвигателя не перегреется.

При соединении обмоток двигателя в треугольник концы обмоток не объединяются в одну точку, а соединяются с другой обмоткой: начало первой фазы соединяют с концом второй, начало второй – с концом третьей, начало третьей – с концом первой. То есть, получается схема, похожая по виду на треугольник, и соединение обмоток в ней идет последовательно друг с другом. Включить обмотки в

треугольник можно только в трехпроводной системе, так как общая точка отсутствует. При схеме соединения «треугольник» линейные  $U$  и фазные  $U_{\phi}$  напряжения равны, а между фазными и линейными токами существует соотношение  $I_{\phi} = I_{\text{лин}}/\sqrt{3}$ .

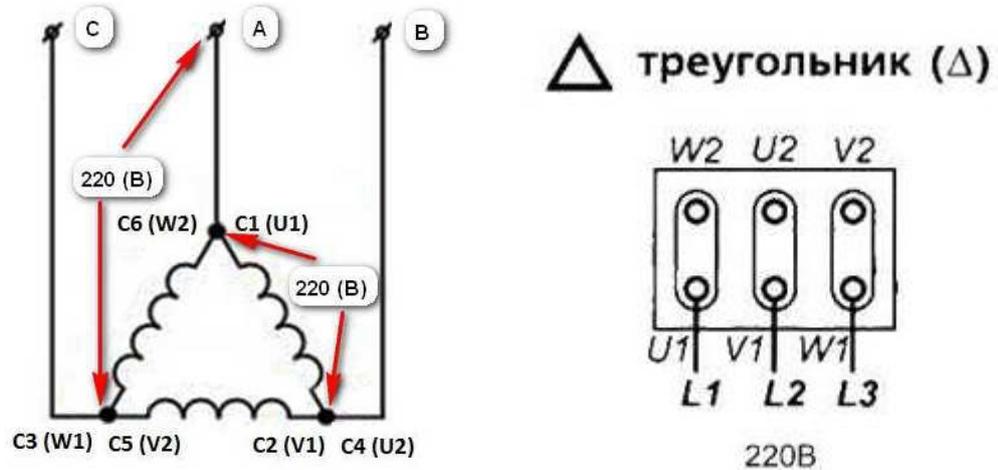


Рисунок 5.4 – Схема соединения обмоток в треугольник

Преимущество соединения по схеме треугольника:

- 1) Получение от электродвигателя наибольшей возможной мощности
- 2) Повышенный вращающий момент;
- 3) Большие тяговые усилия.

Недостатки:

- 1) Повышенный пусковой ток;
- 2) При длительной работе двигатель сильно греется.

Рассмотрим изменение величин токов при изменении схемы соединения.

Предположим, что сначала обмотки двигателя были соединены по схеме «треугольник»:

$$S_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I, \quad (5.1)$$

где  $U$  – напряжение сети (при такой схеме соединения линейные и фазные напряжения равны);

$I$  – линейный ток, А.

Затем схему соединения обмоток двигателя изменяем на звезду. В этом случае на обмотку двигателя подается не линейное, а фазное напряжение. Кроме того, через обмотку проходит фазный ток. Таким образом:

$$S_Y = \sqrt{3} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I}{\sqrt{3}} = \frac{S_{\Delta}}{3}, \quad (5.2)$$

## 5.2 Описание лабораторной установки

Экспериментальная часть лабораторной работы выполняется на стенде «Энергосбережение в системах электроснабжения», состоящем из двух частей (Рисунок 5.1 и 5.2).

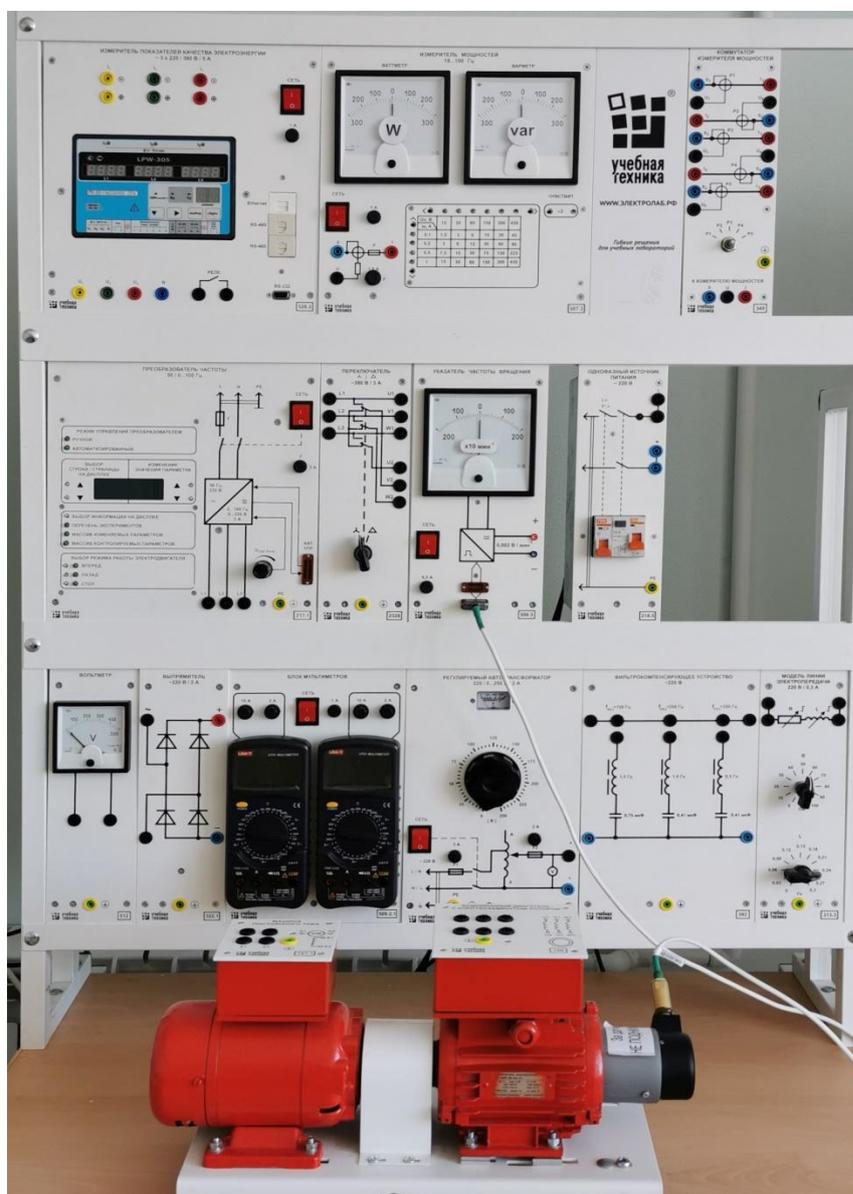


Рисунок 5.1 – Лабораторный стенд, часть 1

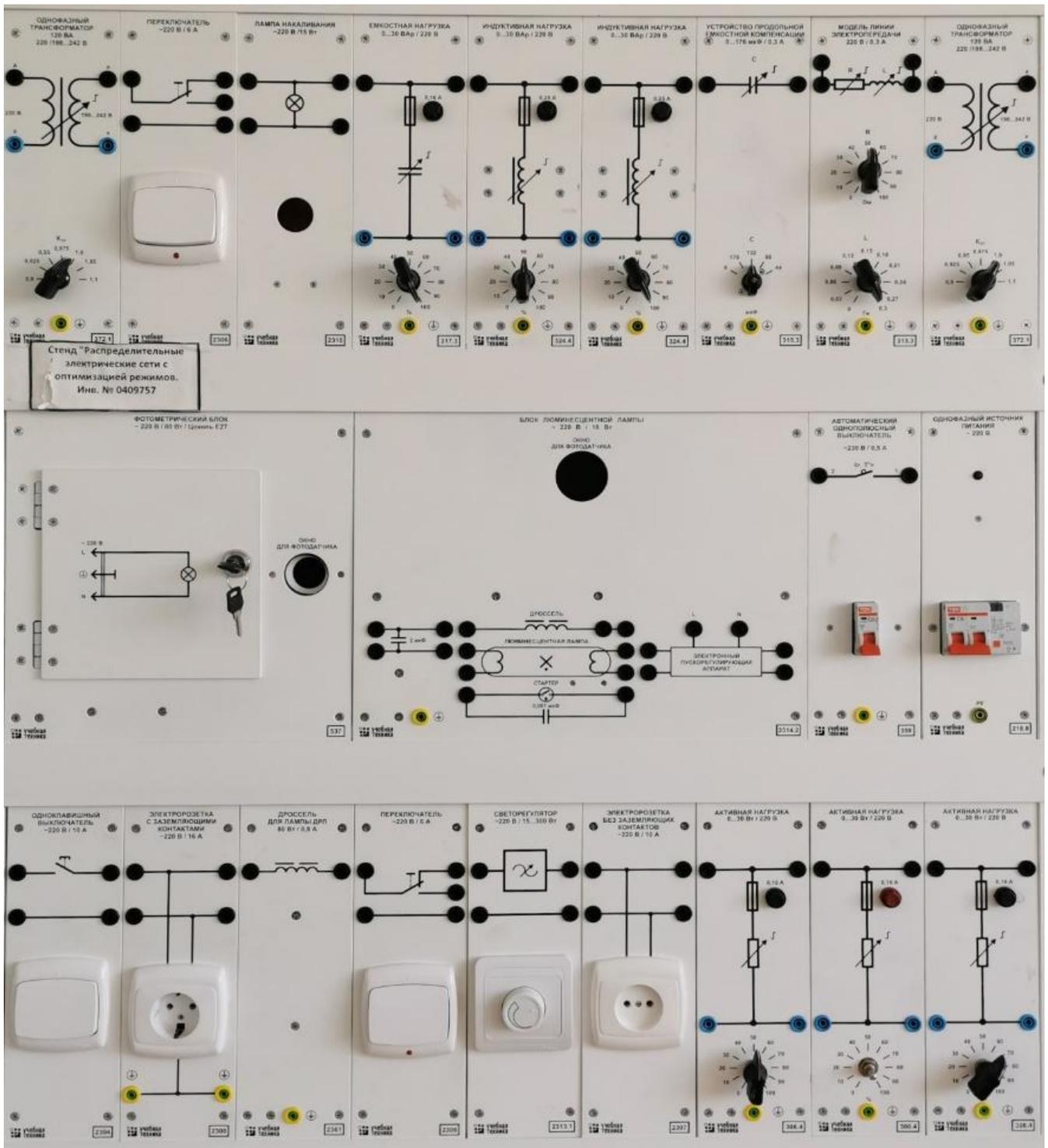


Рисунок 5.2 – Лабораторный стенд, часть 2

Для выполнения данной лабораторной работы потребуются блоки, указанные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Перечень аппаратуры, используемой в эксперименте

Обозначение на схеме	Наименование	Номер блока
G1	Однофазный источник питания	218.5
G2	Однофазный источник питания	218.1
G3	Преобразователь частоты	217
G4	Машина постоянного тока	101.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
M1	Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором	106
A1	Автоматический однополюсный выключатель	359
A4	Активная нагрузка	306.4
A13	Выпрямитель	322.1
A14	Переключатель Y / Δ	2328
P1	Блок мультиметров	509.2
P2	Измеритель мощностей	507.3
P3	Указатель частоты вращения	506.3

### 5.3 Указания по проведению эксперимента на стенде

1 Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2 Соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" однофазного источника питания G1.

3 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рисунок 5.5).

4 Отключите (если включен) выключатель A1.

5 Установите переключателями желаемые параметры нагрузок A4, A5 и A12, например, равными 50%.

6 Установите переключатель A14 в положение «Δ».

7 Включите источники G1 и G2.

8 Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

9 Активизируйте используемые мультиметры.

10 В преобразователе частоты G6 кнопками «ВЫБОР СТРОКИ / СТРАНИЦЫ НА ДИСПЛЕЕ» выберите режим работы «Эксперимент №1: Исследование режимов работы асинхронного двигателя».

11 Кнопкой «ВЫБОР ИНФОРМАЦИИ НА ДИСПЛЕЕ» выберите «МАССИВ ИЗМЕНЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ», далее кнопками «ВЫБОР СТРОКИ / СТРАНИЦЫ НА ДИСПЛЕЕ» и «ИЗМЕНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРА» выберите следующие значения параметров: U номинальное – 220 В, тип характеристики – линейная, выход 1 – скорость, выход 2 – скорость, управление – ручное.

12 Кнопкой «ВЫБОР ИНФОРМАЦИИ НА ДИСПЛЕЕ» выберите «МАССИВ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ».

13 Вращая регулировочную рукоятку, установите задание скорости вращения магнитного поля двигателя M1, например, 157 рад/с (соответствует 1500 об/мин / 50 Гц). Нажмите кнопку «ВПЕРЕД» и убедитесь, что электродвигатель M1 пришел во вращение и на дисплее преобразователя G3 по завершении разгона двигателя M1 отображается скорость вращения его магнитного поля -157 рад/с.

14 Включите выключатель A1.

15 С помощью мультиметров, включенных как вольтметр и амперметр, блока P1 измерьте напряжение  $U_a$  и ток  $I_a$  статорной обмотки генератора G4.

16 С помощью измерителя P2 измерьте величины потребляемых одной фазой двигателя M1 активной P11. и реактивной Q11 мощностей.

17 Нажмите кнопку «СТОП» на блоке 217.1.

18 После остановки двигателя переведите переключатель A14 в положение «Y» и повторите ранее выполненные измерения.

19 Повторите ранее выполненные измерения.

20 По завершении эксперимента отключите выключатель A1, выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте, источники G1, и G2.

21 Для каждой серии измерений, используя полученные данные, вычислите значения, полезной активной мощности P2, полных потребляемых из сети активной P1, и реактивной Q1 мощностей и затем искомым коэффициента полезного действия

$\eta$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по формулам:

$$P_2 = U_a \cdot I_a + 65 \cdot I_a^2, \quad (5.3)$$

$$P_1 = 3 \cdot P_{11}, \quad (5.4)$$

$$Q_1 = 3 \cdot Q_{11}, \quad (5.5)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%, \quad (5.6)$$

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}, \quad (5.7)$$

22 На основании сравнения полученных результатов сделайте вывод о влиянии переключения обмоток мало нагруженного асинхронного двигателя со схемы «треугольник» на схему «звезда» на его коэффициент полезного действия и коэффициент мощности.

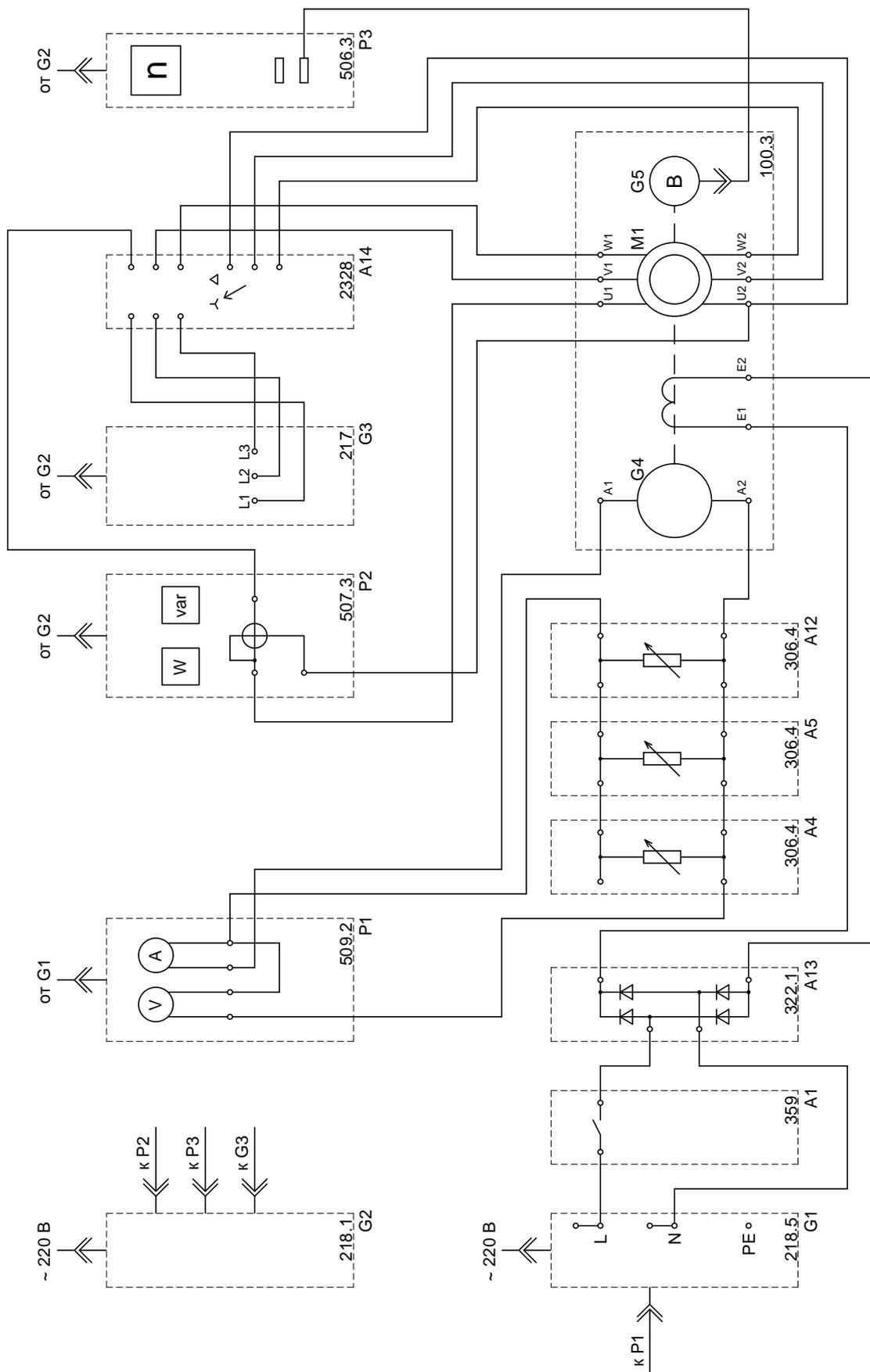


Рисунок 5.5 – Электрическая схема соединений

## 5.4 Контрольные вопросы

- 1 Из-за каких причин двигатель может оказаться недогруженным?
- 2 Какие действия необходимо предпринимать при неполной загрузке двигателя?
- 3 Схема соединения обмоток двигателя в звезду. Преимущества и недостатки.
- 4 Схема соединения обмоток двигателя в треугольник. Преимущества и недостатки.
- 5 За счет чего снижается потребляемая мощность двигателя при изменении схемы соединения его обмоток?

## **6 Лабораторная работа №6. Исследование типичных схем хищения в электрических сетях низкого напряжения**

Цель: изучить схемы подключения электрических счетчиков, при которых возможно хищение электрической энергии. Оценить возможные объемы хищения электроэнергии, сделать выводы.

### **6.1 Краткие теоретические и практические сведения**

Требование ежегодного снижения потерь приводит к постоянной борьбе с их причинами. Одним из видов потерь является хищение электроэнергии потребителями. К основным способам хищения относят:

- несанкционированное подключение к электрической сети;
- вмешательство в работу прибора учета потребления (магниты, «жучки»);
- нарушение схемы подключения прибора учета потребителя.

Методы борьбы с хищением электроэнергии можно разделить на аналитические и практические. К аналитическим (косвенным) методам можно отнести следующие:

- 1) Систематическая сверка показаний общих счетчиков;
- 2) Выявление аномальных показаний;
- 3) При использовании технологии удаленного сбора показаний АСКУЭ — выявление несоответствий количественных характеристик нагрузки внешним факторам. Например, потребления электроэнергии по прибору учета нет, а участок собственника интенсивно освещается.

- 4) Выявление несоответствий проверяемой нагрузки внешним факторам с помощью токосъемных клещей или мультиметра. Например, токосъемными клещами фиксируется большая нагрузка, а показания счетчика не изменяются.

К практическим методам можно отнести:

- 1) Использование антимагнитной пломбы.

2) Проверка соответствия схемы соединения приборов учета с помощью вольтамперфазометра.

3) Контроль нагрузки на общедомовых линиях и линиях общего пользования — возможно несанкционированное подключение к ним с соответствующим резким ростом нагрузки.

4) Визуальный контроль приборов учета и подходящих к ним линий для исключения обходных линий электроснабжения, взаимной замены фазного провода с нулевым и механического торможения или остановки приборов учета.

5) При визуальном контроле помещения потребителя обращать внимание на наличие габаритного электрооборудования, трансформаторов, накидных штанг с крючками для наброса на воздушные линии, дополнительных линий заземления, а также на состояние розеток (при включении земли в нулевую проводку через розетку, одно из отверстий большего другого).

## **6.2 Описание лабораторной установки**

Экспериментальная часть лабораторной работы выполняется на стенде «Учет электрической энергии» (Рисунок 6.1). Для выполнения данной лабораторной работы потребуются блоки, в зависимости от характера собираемой схемы, указанные в таблице 6.1.

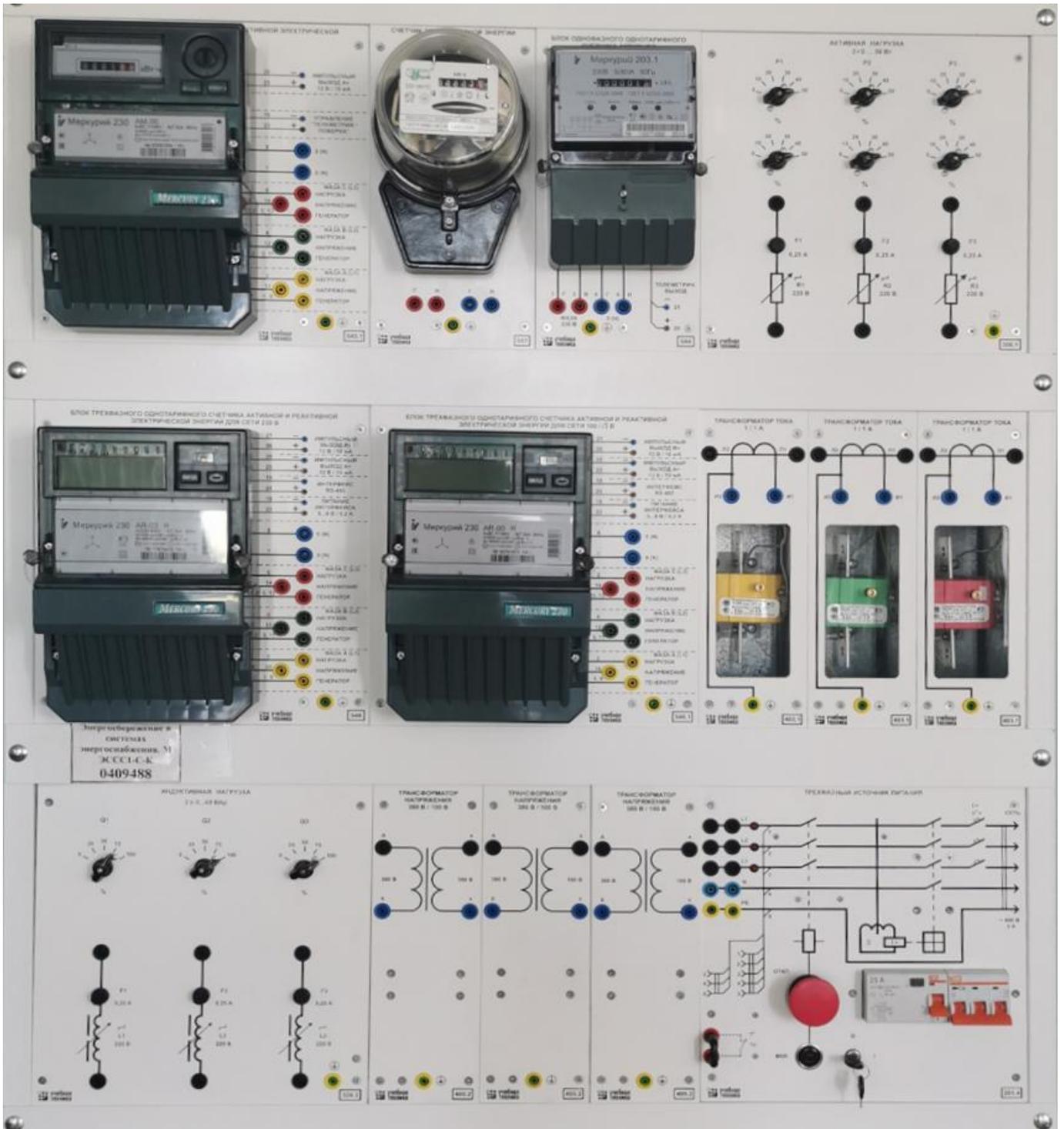


Рисунок 6.1 – Лабораторный стенд

### 6.3 Указания по проведению эксперимента на стенде

6.3.1 Подключение однофазного индукционного счетчика электрической энергии СО-И4491М

1 Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2 Соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте (таблица 6.1), с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.

Таблица 6.1 – Перечень аппаратуры, используемой в эксперименте

Обозначение на схеме	Наименование	Номер блока
G1	Трехфазный источник питания	201.4
A1	Активная нагрузка	306.1
P6	Счетчик электрической энергии	517

3 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой подключения счетчика (рисунок 6.2).

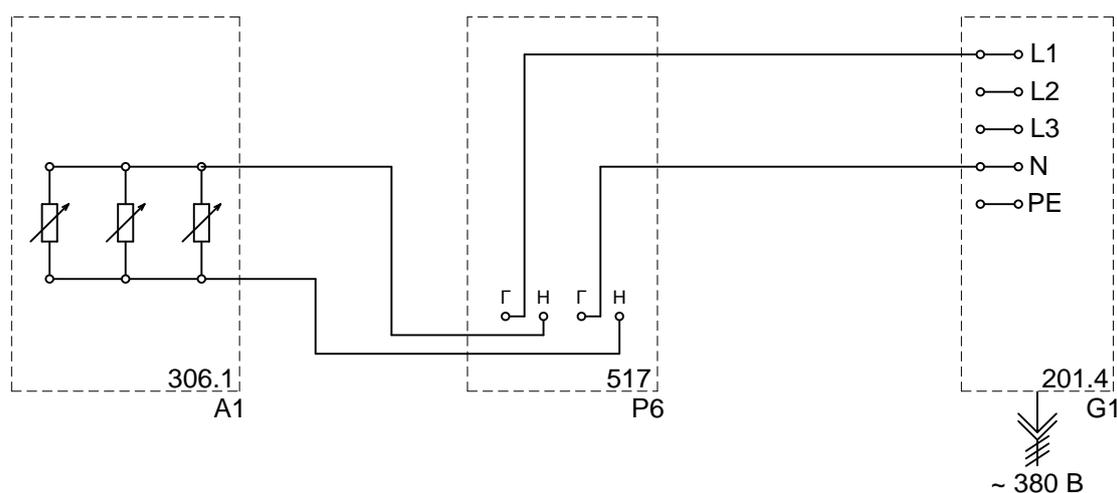


Рисунок 6.2 – Электрическая схема соединений

4 Установите номинальную мощность каждой фазы активной нагрузки A1, например, 40 Вт (80%).

5 Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

6 Следите за счетчиком P6. При правильном включении счетчика его диск будет вращаться вправо по стрелке.

7 Снимите показания счетчика, например, путем подсчета числа оборотов диска за интервал времени, например, 10 минут и определите потребленную за это время нагрузкой А1 активную электрическую энергию  $W_{и}$  в кВт·ч путем деления этого числа на 600.

8 По завершении эксперимента отключите трехфазный источник питания G1 нажатием на кнопку «красный гриб».

### 6.3.2 Моделирование ненормальных схем подключения однофазного индукционного счетчика СО-И4491 М и оценка недоучтенной им электроэнергии

1 Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2 Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.

3 Соедините аппаратуру (таблица 6.2) в соответствии с ненормальной схемой подключения счетчика, выбранной из схем, приведенных на рисунках 6.3-6.10. При моделировании схемы с включенным отмоточным трансформатором (рисунок 6.9) коэффициент трансформации трансформатора А9 установите равным меньше 1, например, 0,95. В эксперименте с токоограничивающим резистором его следует поместить на горизонтальную поверхность до эксперимента. **После завершения эксперимента подождать его охлаждения!**

Таблица 6.2 – Перечень аппаратуры, используемой в эксперименте

Обозначение на схеме	Наименование	Номер блока
G1	Трехфазный источник питания	201.4
A1	Активная нагрузка	306.1
P6	Счетчик электрической энергии	517
A9	Однофазный трансформатор	372.1
A10	Миниблок резистора	3333

4 Установите номинальную мощность каждой фазы активной нагрузки А1, такую же, как в эксперименте из пункта 6.3.1.

5 Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

6 Зафиксируйте состояние диска счетчика P6 и если он вращается – направление вращения.

7 Снимите показания счетчика, например, путем подсчета числа оборотов диска за интервал времени, например, 10 минут и определите якобы потребленную за это время нагрузкой A1 активную электрическую энергию  $W$  в кВт·ч путем деления этого числа на 600.

8 По завершении эксперимента отключите трехфазный источник питания G1 нажатием на кнопку «красный гриб».

9 Вычислите относительное значение недоучтенной (похищенной) электрической энергии по формуле:

$$K_x = (1 - W/W_{\text{и}}) \cdot 100 [\%]. \quad (6.1)$$

10 При вращении диска счетчика в направлении обратном нормальному при вычислении следует принимать  $W = 0$ .

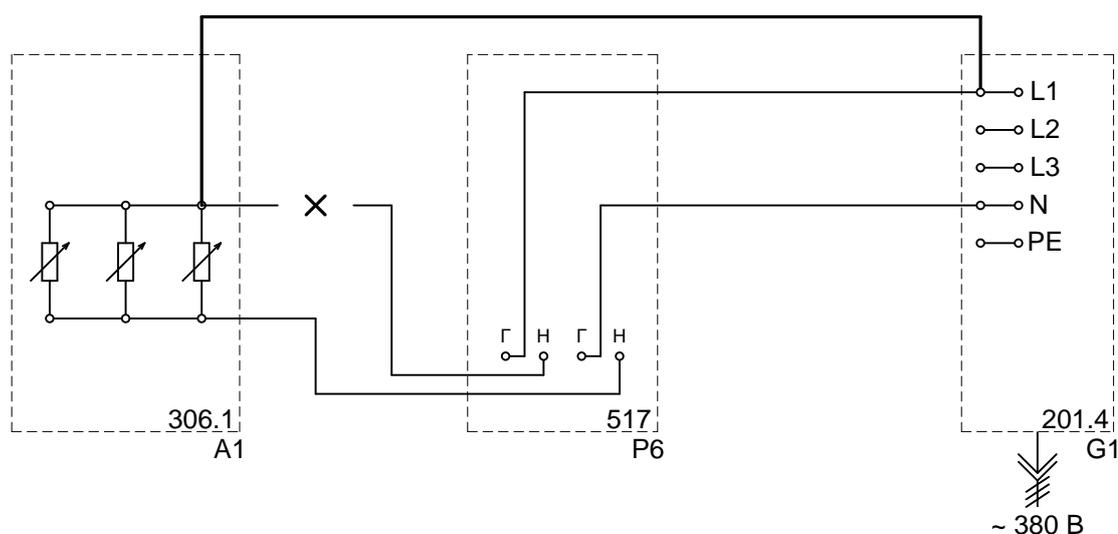


Рисунок 6.3 – Схема с оборванной токовой цепью

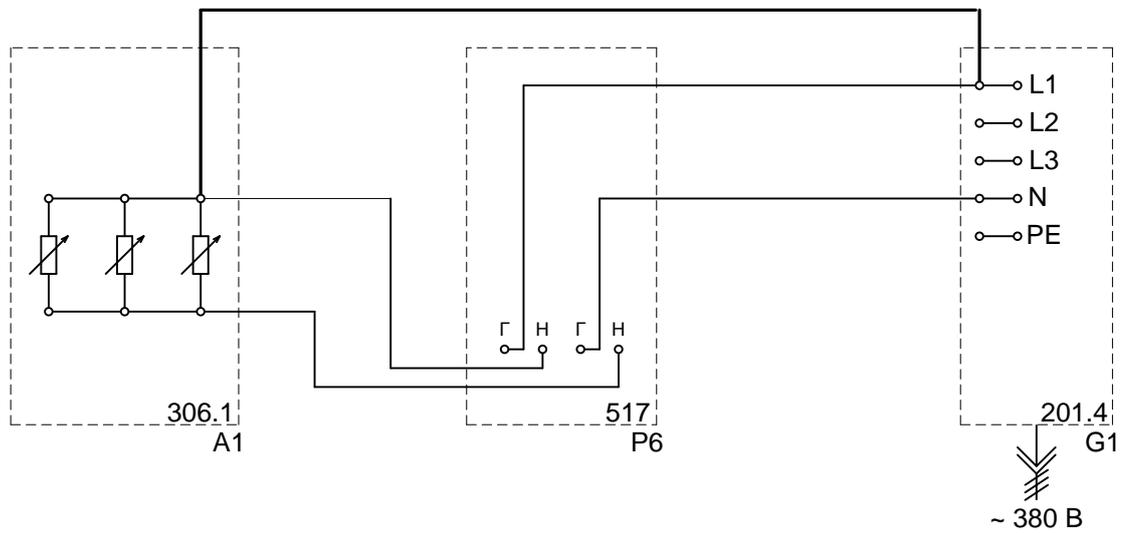


Рисунок 6.4 – Схема с шунтом в токовой цепи

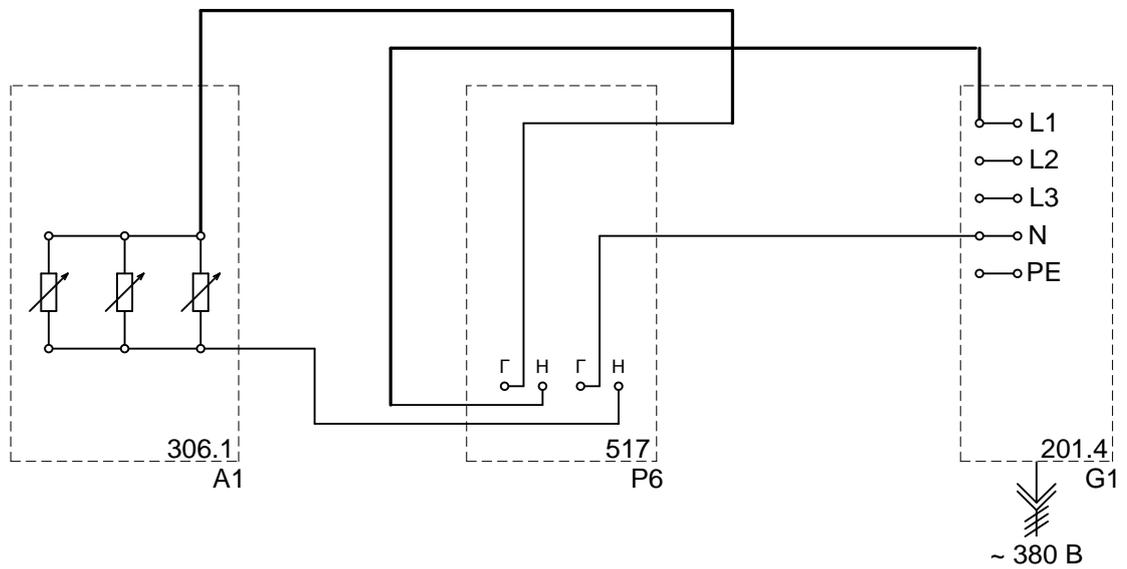


Рисунок 6.5 – Схема с обратным включением токовой цепи

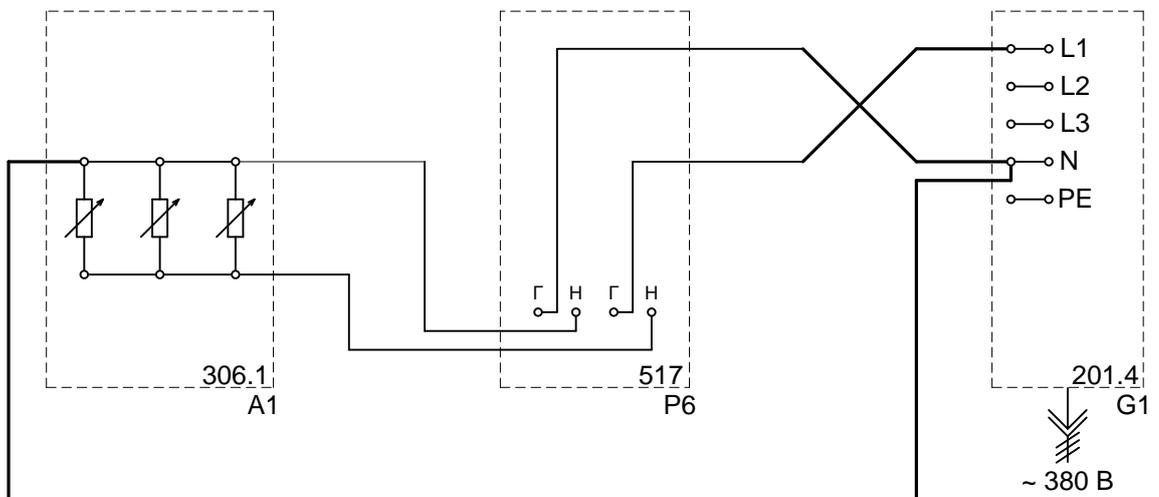


Рисунок 6.6 – Схема с переключенными фазным и нулевым проводниками

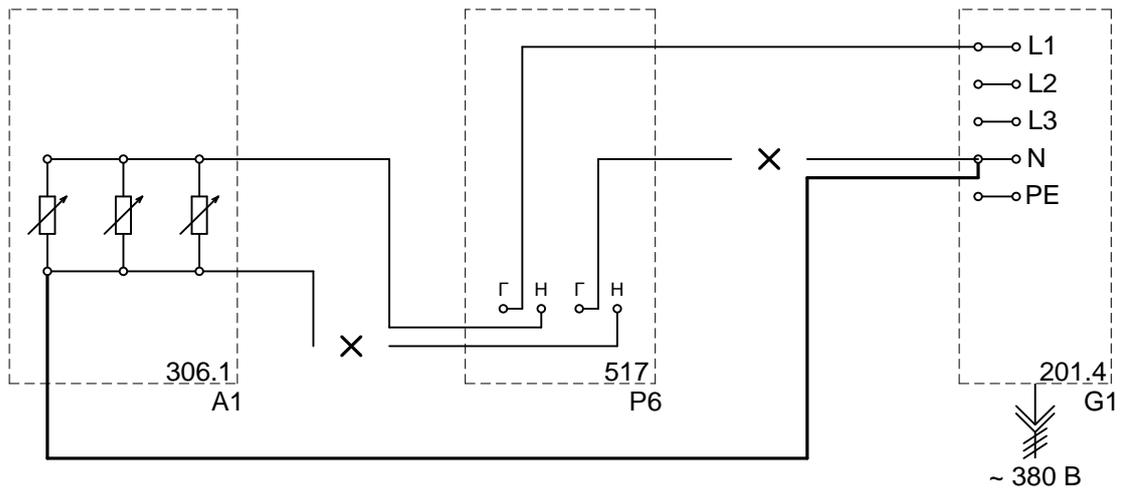


Рисунок 6.7 – Схема с оборванной цепью напряжения

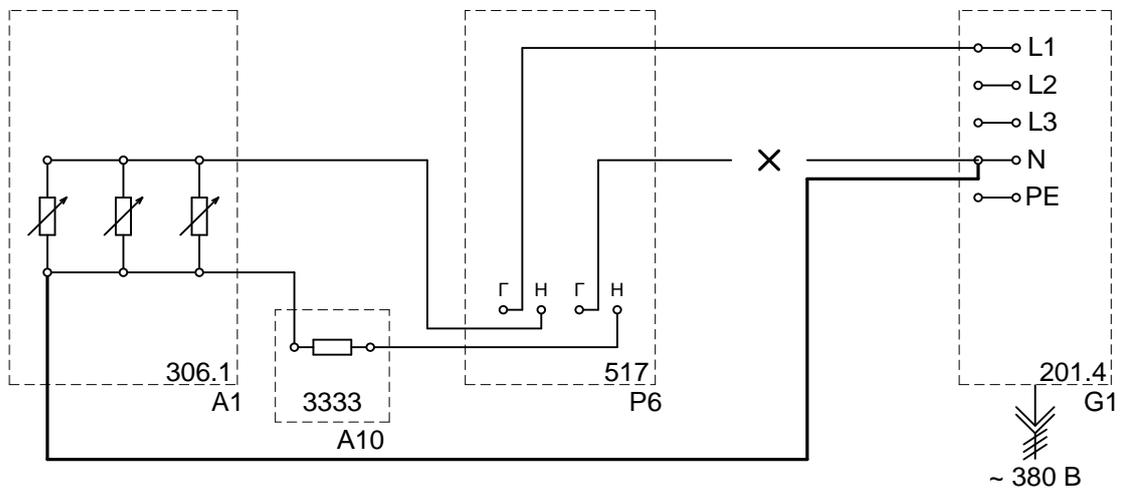


Рисунок 6.8 – Схема с включенным токоограничивающим резистором в цепи напряжения



Таблица 6.3 – Перечень аппаратуры, используемой в эксперименте

Обозначение на схеме	Наименование	Номер блока
G1	Трехфазный источник питания	201.4
A1	Активная нагрузка	306.1
P1	Блок однофазного однотарифного счетчика активной электрической энергии	544

3 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой подключения счетчика (рисунок 6.10).

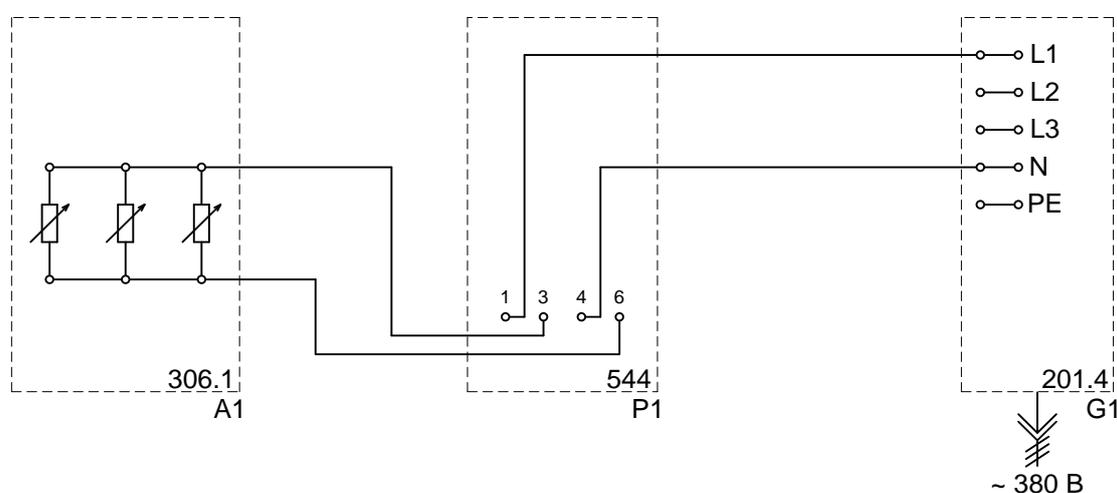


Рисунок 6.10 – Электрическая схема соединений

4 Установите номинальную мощность каждой фазы активной нагрузки A1, например, 40 Вт (80%).

5 Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

6 Следите за счетчиком P1. При правильном включении счетчика должен мигать светодиод импульсного выхода и должны вращаться барабаны его отсчетного устройства.

7 Снимите показания счетчика, например, путем подсчета числа миганий светодиода импульсного выхода за интервал времени, например, 10 минут и

определите потребленную за это время нагрузкой А1 активную электрическую энергию  $W_{и}$  в кВт·ч путем деления этого числа на 3200.

8 По завершении эксперимента отключите трехфазный источник питания G1 нажатием на кнопку «красный гриб».

6.3.4 Моделирование ненормальных схем подключения однофазного статического счетчика Меркурий 203.1 и оценка недоучтенной им электроэнергии

1 Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2 Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте (таблица 6.4), с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.

Таблица 6.4 – Перечень аппаратуры, используемой в эксперименте

Обозначение на схеме	Наименование	Номер блока
G1	Трехфазный источник питания	201.4
A1	Активная нагрузка	306.1
P1	Блок однофазного одностарифного счетчика активной электрической энергии	544
A9	Однофазный трансформатор	372.1
A10	Миниблок резистора	3333

3 Соедините аппаратуру в соответствии с ненормальной схемой подключения счетчика, выбранной из схем, приведенных на рисунках 6.11 – 6.17. При моделировании схемы рисунка 6.17 коэффициент трансформации трансформатора А9 установите равным меньше 1, например, 0,95. В эксперименте с токоограничивающим резистором его следует поместить на горизонтальную поверхность до эксперимента. **После завершения эксперимента подождать его охлаждения!**

4 Установите номинальную мощность каждой фазы активной нагрузки А1 такую же, как в эксперименте из пункта 6.3.3.

5 Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

6 Снимите показания счетчика, например, путем подсчета числа миганий светодиода импульсного выхода за интервал времени, например, 10 минут и определите якобы потребленную за это время нагрузкой A1 активную электрическую энергию  $W$  в кВт·ч путем деления этого числа на 3200.

7 По завершении эксперимента отключите трехфазный источник питания G1 нажатием на кнопку «красный гриб».

8 Вычислите относительное значение недоучтенной (похищенной) электрической энергии по формуле 6.1.

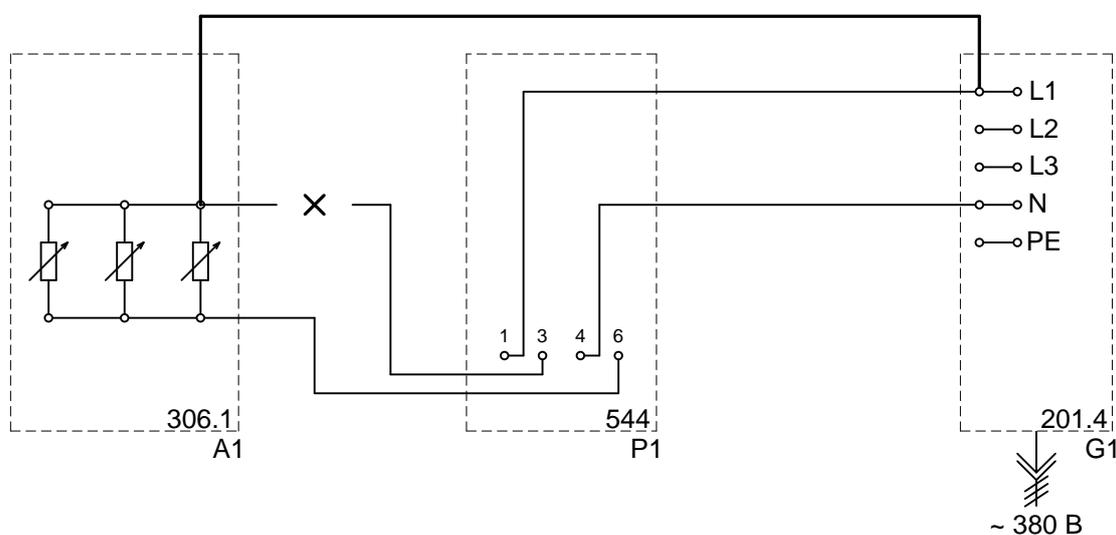


Рисунок 6.11– Схема с оборванной токовой цепью

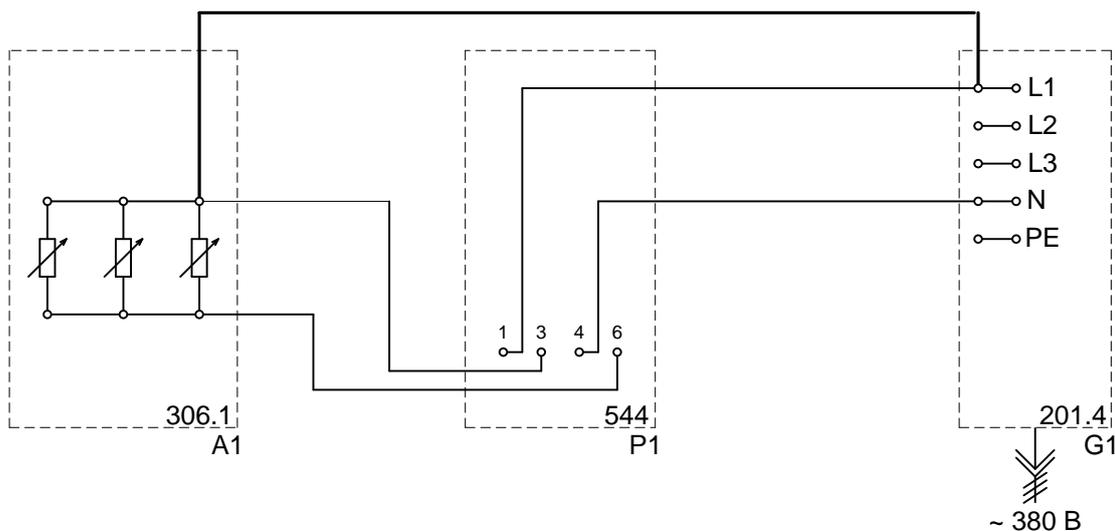


Рисунок 6.12 – Схема с шунтом в токовой цепи

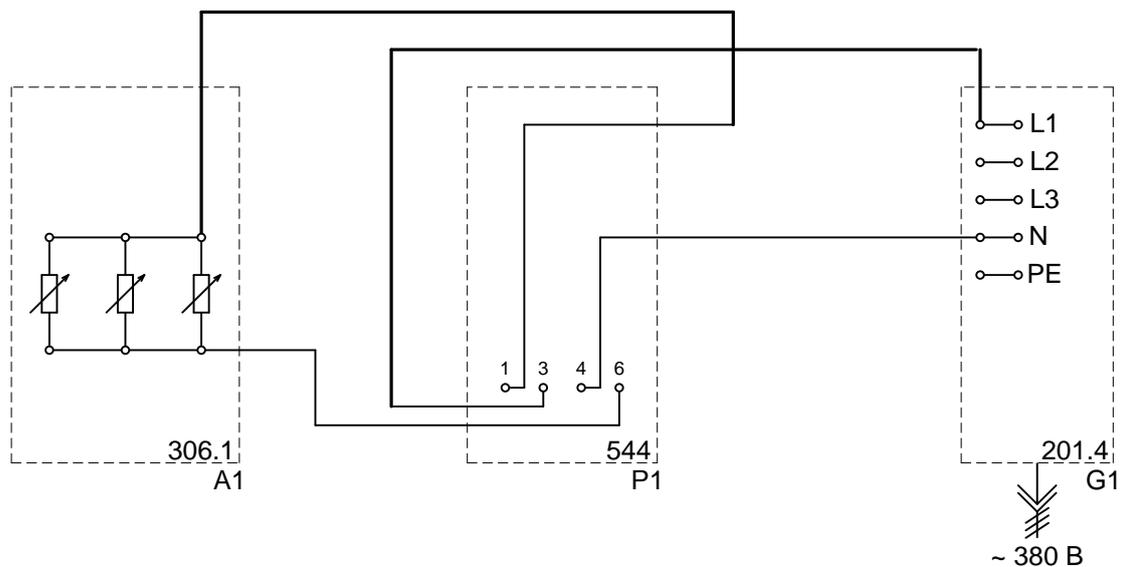


Рисунок 6.13 – Схема с обратным включением токовой цепи

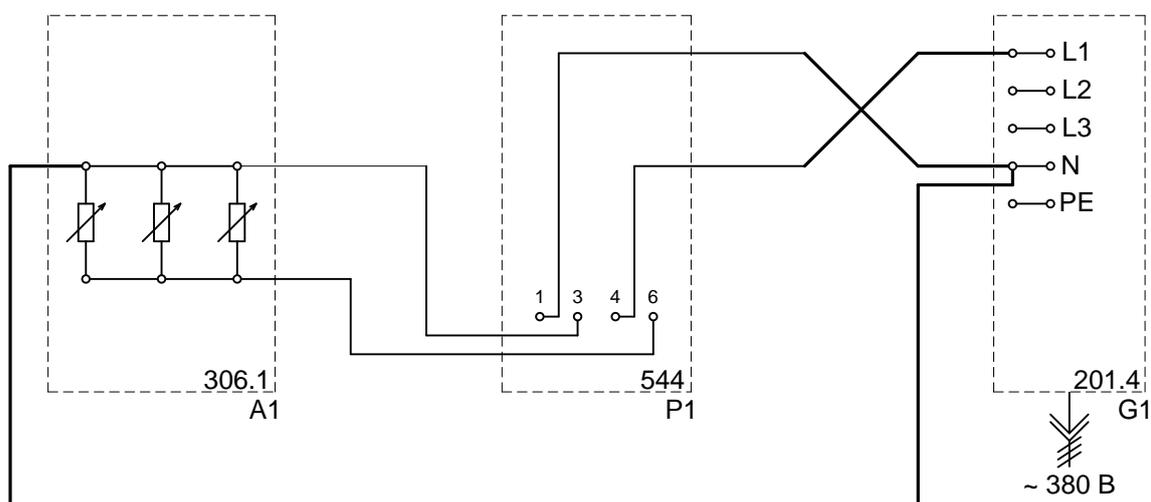


Рисунок 6.14 – Схема с переключенными фазным и нулевым проводниками

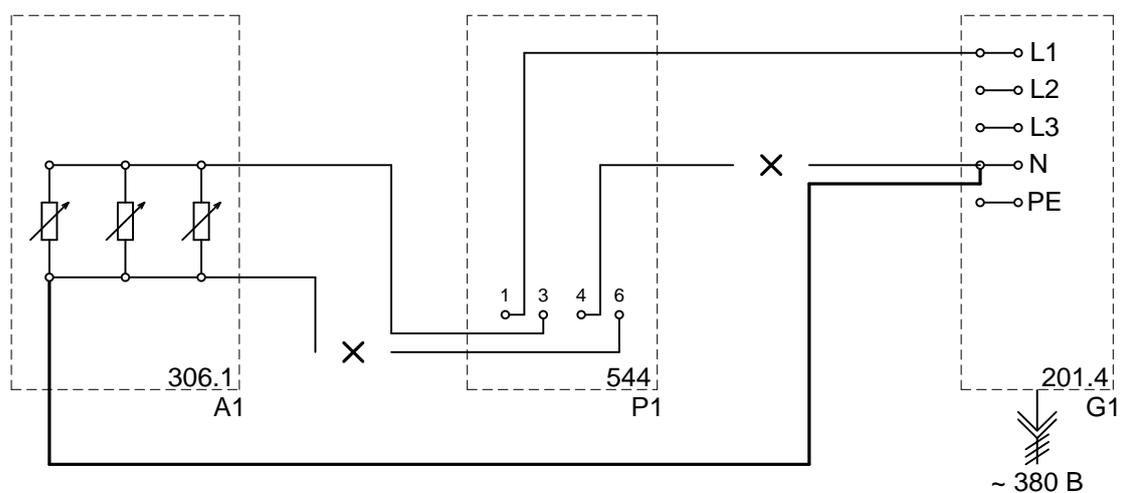


Рисунок 6.15 – Схема с оборванной цепью напряжения

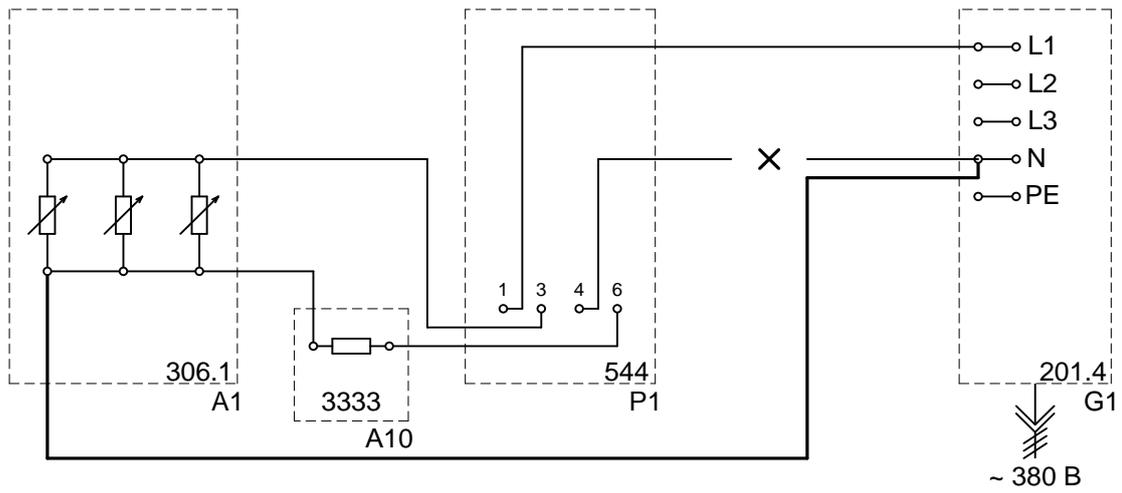


Рисунок 6.16 – Схема с включенным токоограничивающим резистором в цепи напряжения

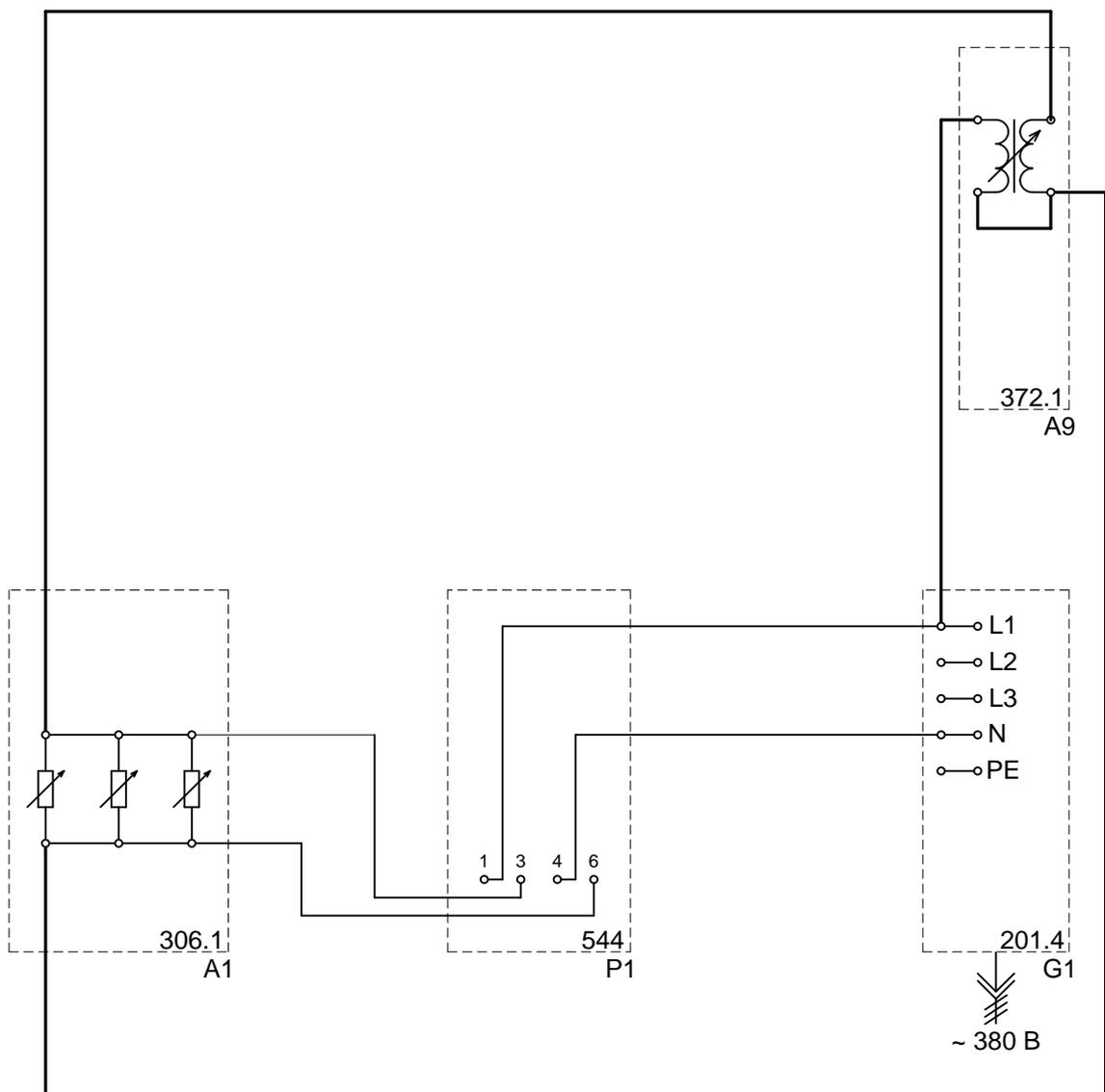


Рисунок 6.17 – Схема с включенным отмоточным трансформатором

## **6.4 Указания по оформлению отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать:

1) Титульный лист

2) Название лабораторной работы;

3) Цель лабораторной работы;

4) Основные теоретические сведения, касающиеся:

– классификации счетчиков электроэнергии;

– принципа их работы;

– способов хищения электроэнергии;

4) Расчетную часть и вывод о наиболее «эффективном» способе хищения электроэнергии.

## **6.5 Контрольные вопросы**

1 Перечислите основные способы хищения электрической энергии.

2 Перечислите основные способы борьбы с хищением электрической энергии.

3 За счет каких физических процессов происходит уменьшение показаний счетчика электрической энергии при обратном включении токовой цепи?

4 За счет каких физических процессов происходит уменьшение показаний счетчика электрической энергии при обрыве цепей напряжения?

5 За счет каких физических процессов происходит уменьшение показаний счетчика электрической энергии при переключении фазного и нулевого проводника?

6 За счет каких физических процессов происходит уменьшение показаний счетчика электрической энергии при использовании отмоточного трансформатора?

## **7 Лабораторная работа №7. Исследование влияния изменения напряжения на основные характеристики осветительных приборов**

Цель: изучить влияние изменения напряжения на светотехнические и электротехнические характеристики осветительных приборов

### **7.1 Краткие теоретические и практические сведения**

Из всех характеристик питающей сети, наибольшее влияние на работу осветительных приборов оказывает величина питающего напряжения. Степень влияния отклонения напряжения на светотехнические характеристики осветительных приборов зависит от их типа и принципа работы.

С точки зрения сети лампа накаливания представляет собой линейное сопротивление. Следовательно, при изменении величины подведенного напряжения изменяется ток, проходящий через лампу. От величины протекающего тока существенно зависит накал лампы, а значит и выдаваемый световой поток. Причем эта зависимость крайне нелинейна: падение светового потока происходит быстрее, чем падение подводимого напряжения. При увеличении напряжения наблюдается обратная ситуация: увеличивается световой поток и световая отдача. Однако негативным эффектом при работе ламп накаливания на повышенном напряжении является резкое уменьшение срока службы осветительного прибора: повышение напряжения всего на 5% уменьшает срок службы лампы накаливая практически вдвое. Более подробно зависимости светового потока, световой отдачи и срока службы ламп накаливания от приложенного напряжения, представлены на рисунке 7.1.

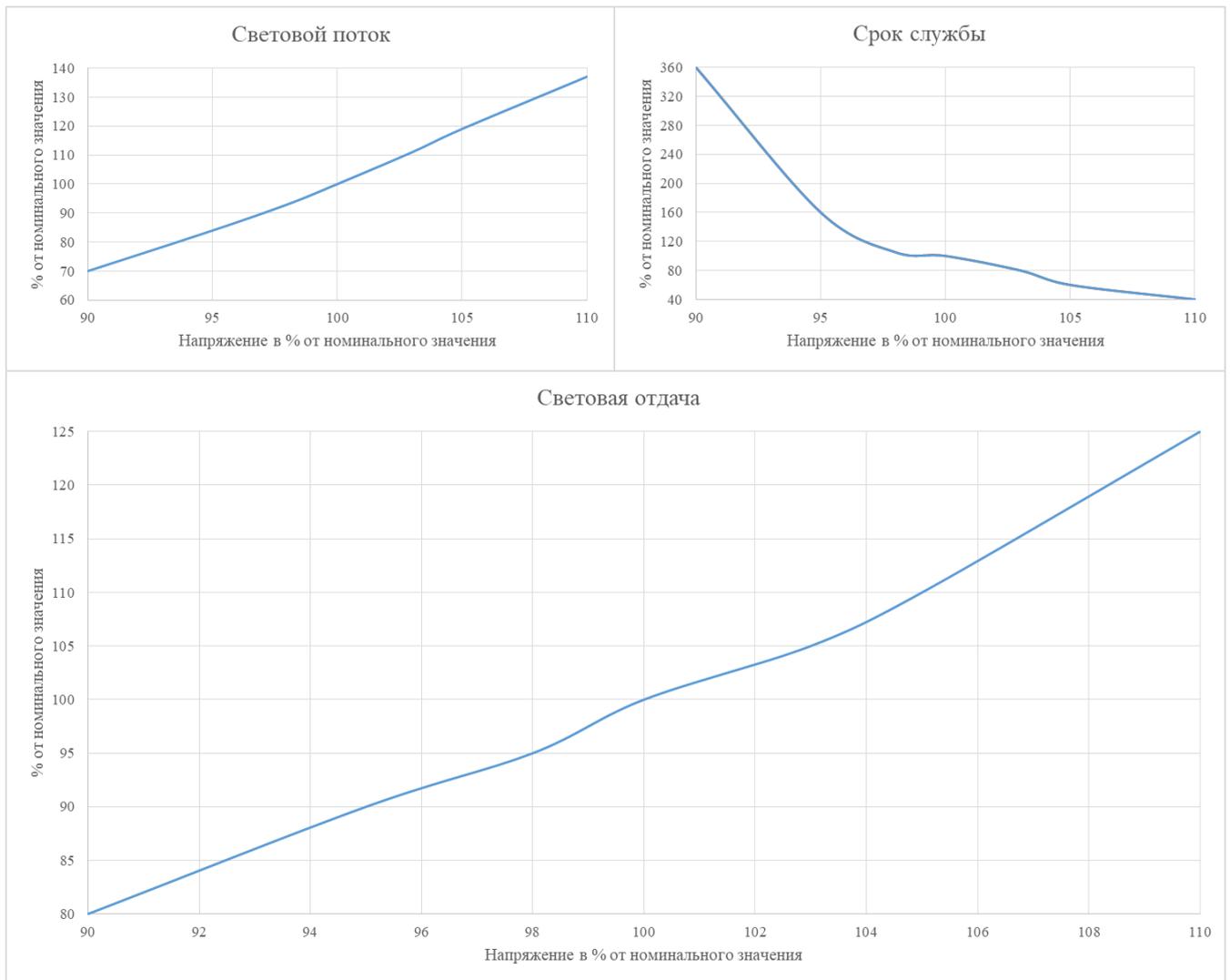


Рисунок 7.1 – Зависимость светового потока, световой отдачи и срока службы ламп накаливания от приложенного напряжения

Для люминесцентных ламп зависимость светового потока от величины приложенного напряжения не столь выражена: на световой поток в основном влияют параметры тлеющего разряда в колбе лампы, определяемые характеристиками пуско-регулирующего аппарата. До определенной величины провала напряжения, тлеющий разряд поддерживается, и визуально различного падения светового потока лампы не происходит (хотя он может быть зафиксирован приборами). Хуже дело обстоит с пульсациями светового потока. Из-за снижения напряжения уменьшается частота тока, питающего разряд колбы лампы и резко увеличиваются пульсации светового потока. При повышении напряжения также происходит едва различимое невооруженным глазом увеличение яркости свечения

лампы: верхняя граница допустимого напряжения ограничена стойкостью входного контура электронного пуско-регулирующего аппарата.

У светодиодных источников света, зависимость светового потока от напряжения определяется конструкцией драйвера. Наиболее примитивным вариантом, встречающимся преимущественно в дешевых светодиодных лампах, является использование понижающей RC-цепочки и диодного моста для выпрямления переменного напряжения. Строго говоря, данная конструкция не является драйвером для светодиодов, так как она не способна обеспечить постоянство тока, протекающего через светодиоды в широком диапазоне входных напряжений. Единственным плюсом такой конструкции является низкая цена, а недостатками – высокий коэффициент пульсаций и сильная зависимость светового потока от величины питающего напряжения. Особенно сильно подобные лампы уязвимы перед повышением напряжения: оно вызывает пропорциональное повышение тока, протекающего через светодиоды, их перегрев и преждевременный выход из строя.

Всех вышеперечисленных недостатков лишены так называемые IC драйверы, использующие специальные микросхемы для стабилизации тока, протекающего через светодиоды. Драйверы этого типа более сложные и дорогие, но зато они обеспечивают малый коэффициент пульсаций и стабильную работу источника света в широком диапазоне входных напряжений. Светодиодная лампа с IC драйвером может сохранять практически стабильный световой поток в диапазоне напряжений от 160 до 250 Вольт, что является большим преимуществом в сетях с высокими перепадами напряжения.

## **7.2 Описание лабораторной установки**

Экспериментальная часть лабораторной работы выполняется на стенде «Энергоаудит системы электрического освещения» (Рисунок 7.1). Для выполнения данной лабораторной работы потребуются блоки, указанные в таблице 7.1.

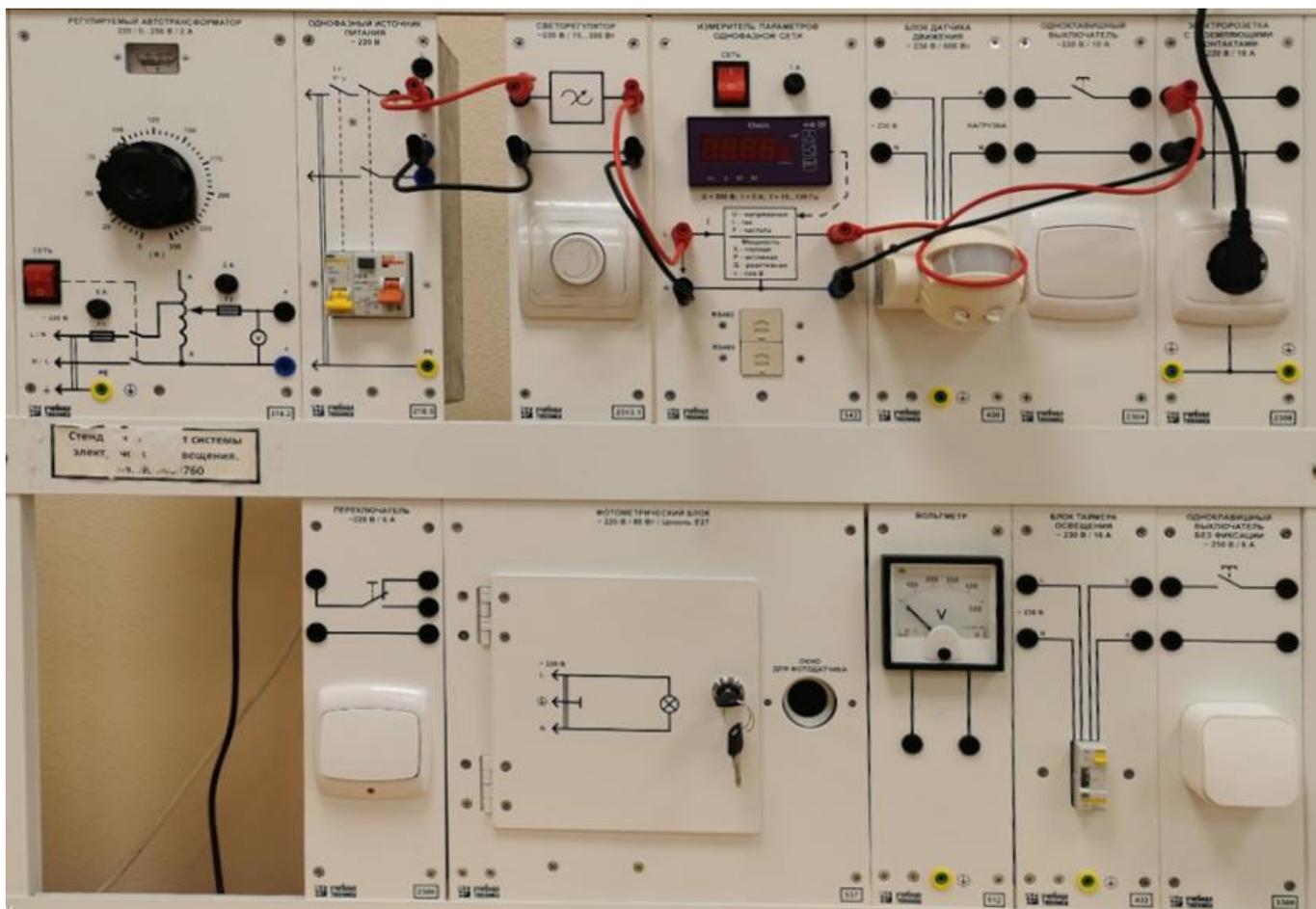


Рисунок 7.1 – Лабораторный стенд

Таблица 7.1 – Перечень аппаратуры, используемой в эксперименте

Обозначение на схеме	Наименование	Номер блока
G1	Однофазный источник питания	218.5
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.2
A2	Одноклавишный выключатель	2304
A3	Электророзетка с заземляющими контактами	2308
A4	Фотометрический блок	537
P2	Измеритель параметров однофазной сети	542
P3	Пульсметр-люксметр	1422

### 7.3 Указания по проведению эксперимента на стенде

1 Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2 Соедините гнезда защитного заземления "⊕" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" однофазного источника питания G1.

3 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рисунок 7.2).

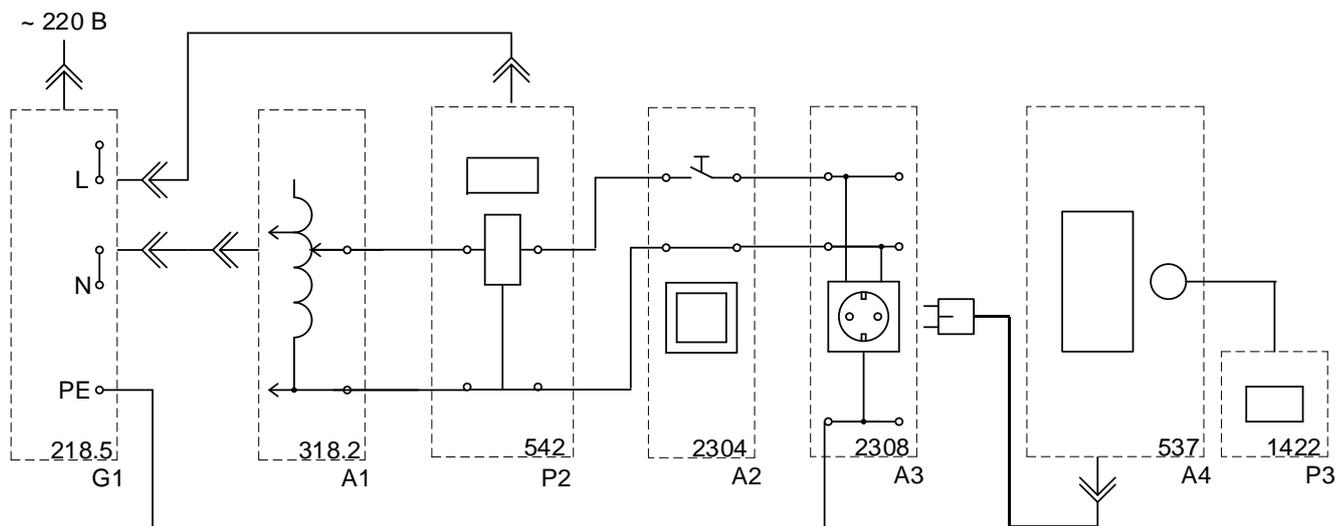


Рисунок 7.2 – Электрическая схема соединений

4 Убедитесь, что все выключатели отключены, в том числе одноклавишный выключатель (блок 2304).

5 Откройте дверцу фотометрического блока A4, вверните в патрон лампу накаливания с молочной колбой мощностью, например, 60 Вт и закройте дверцу.

6 Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора A1 до положения соответствующего напряжению 220 - 230 В.

7 Попросите преподавателя проверить правильность собранной схемы.

8 Включите источник G1 (блок 218.5). Должен загореться светодиод.

9 Включите люксметр, откалибруйте его датчик и поместите его в окно фотометрического блока 537

10 Включите выключатели «СЕТЬ» автотрансформатора A1 и измерителя параметров однофазной сети блок 542.

11 Включите одноклавишный выключатель, должна загореться лампа накаливания.

12 Установите на блоке 542 режим измерения напряжения с помощью кнопки.

13 Контролируя по блоку 542 напряжение, установите на выходе автотрансформатора А1 желаемое напряжение, например, 230 В.

14 С помощью люксметра измерьте светотехнические параметры (освещенность  $E$ , коэффициент пульсации  $K_p$ ). Запишите их в таблицу 7.2

15 С помощью блока 542 измерьте электротехнические параметры источника света (напряжение  $U$ , потребляемый ток  $I$ , потребляемые мощности: полную  $S$ , активную  $P$ , реактивную  $Q$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi$ )

16 Повторить пункты 14,15 при различных значениях напряжения в диапазоне от 110 до 240 с шагом в 10 В.

17 Сведите полученные данные в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Таблица для заполнения

Напряжение (U), В	110	120	130	...	240
Потребляемый ток (I), А					
Полная мощность (S), ВА					
Активная мощность (P), Вт					
Реактивная мощность (Q), ВАр					
$\cos\varphi$					
Освещенность( $E$ ), лк					
Коэффициент пульсаций ( $K_p$ ), %					
$\frac{E}{P}$					
$\frac{E}{S}$					

18 Отключите блоки 542, 318.2, 218.5

19 Замените лампу накаливания в фотометрическом блоке на компактную люминесцентную лампу. **Обратите внимание, что лампа может быть горячей**

20 Повторите пункты эксперимента для компактной люминесцентной лампы и светодиодной. Запишите данные в таблицы.

21 Отключите питание стенда с помощью блоков 542, 318.2, 218.5, приведите стенд в исходное состояние

22 Определите для каждой лампы отношение освещенности к потребляемой активной и полной мощности:

$$\frac{E}{P}, \quad (7.1)$$

$$\frac{E}{S}, \quad (7.2)$$

23 Внесите результаты расчетов в соответствующие строки таблиц

24 Постройте графики зависимостей основных светотехнических и электротехнических параметров источников света от напряжения. Изобразите на одном графике сравнение одноименных параметров для разных ламп.

#### **7.4 Указания по оформлению отчета по лабораторной работе**

Отчет должен содержать:

- 1) Титульный лист.
- 2) Название лабораторной работы.
- 3) Цель лабораторной работы.
- 4) Основные теоретические сведения, касающиеся:
  - основных характеристик осветительных приборов;
  - влияния изменения напряжения на основные характеристики осветительных приборов;

5) Графики зависимостей величины светового потока, световой отдачи и коэффициента пульсаций от величины приложенного к источнику света напряжения.

6) Расчетную часть и вывод о влиянии значения напряжения на характеристики осветительных приборов.

### **7.5 Контрольные вопросы**

1 Каким образом влияет изменение величины питающего напряжения на светотехнические характеристики ламп накаливания?

2 Каким образом влияет изменение величины питающего напряжения на светотехнические характеристики люминесцентных ламп?

3 Каким образом влияет изменение величины питающего напряжения на светотехнические характеристики светодиодных ламп?

4 Каким образом изменение величины питающего напряжения влияет на коэффициент пульсации источников света?

## **8 Лабораторная работа №8. Определение мест повышенных тепловых потерь с помощью тепловизора**

Цель работы: изучение основных принципов работы с тепловизионным оборудованием и знакомство с нормативными документами в области тепловой защиты зданий.

### **8.1 Краткие теоретические сведения**

Тепловизор – устройство, позволяющее получить изображение, демонстрирующее распределение температур по исследуемой поверхности. Принцип действия тепловизора основан на том, что все тела, температура которых выше абсолютного нуля излучают тепловое электромагнитное излучение, которое может быть зарегистрировано и измерено. С увеличением температуры смещается максимум спектральной плотности излучения. Для наиболее часто встречающихся температур, максимум плотности излучения приходится на длины волн в диапазоне от 3 до 14 мкм: большинство тепловизоров работают с этим диапазоном волн. При дальнейшем нагреве тела до температур выше тысячи градусов Цельсия, их тепловое свечение сдвигается в видимый диапазон и может быть зафиксировано невооруженным взглядом.

Необходимо заметить, что тепловизор нельзя считать измерительным прибором в привычном понимании. Тепловизионная картина (термограмма) позволяет лишь косвенно судить о распределении температур по поверхности исследуемого объекта. Это связано с тем, что оптические свойства реальных материалов могут существенно отличаться от свойств абсолютно черного тела: каждый материал обладает своими свойствами рассеяния, испускания и поглощения теплового излучения, что приводит к ошибкам измерения. На рисунке 8.1 отражающая поверхность нижней части здания даёт паразитное излучение от окружающих объектов, что приводит к завышению температур на термограмме.

Дополнительным искажающим фактором является темный цвет фасада, приводящий к увеличенному поглощению теплового излучения.

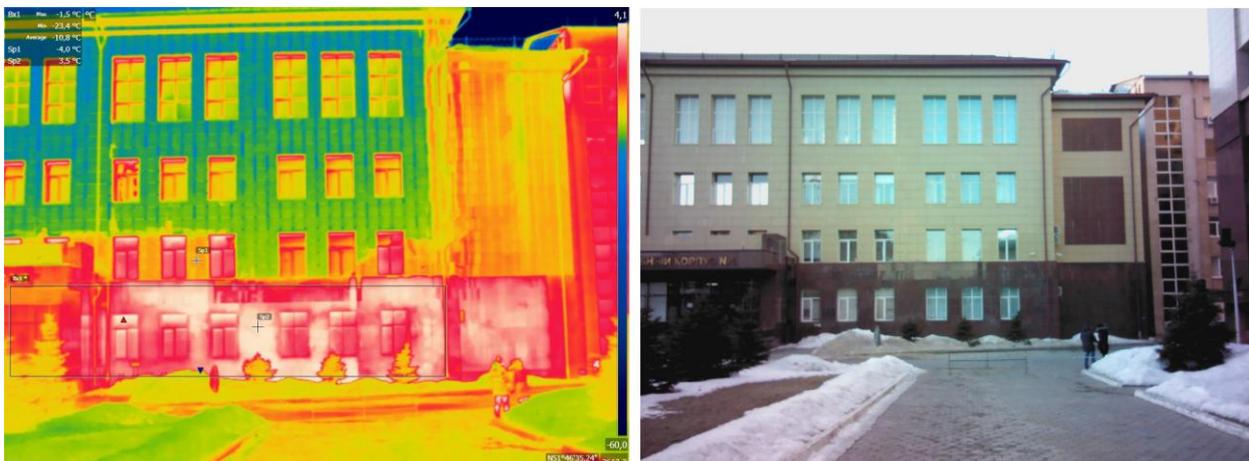


Рисунок 8.1 – Иллюстрация влияния отражения на термограмму

Различия в свойствах теплового испускания приводят к занижению показаний температуры. На рисунке 8.2 оптические свойства снега существенно отличаются от свойств асфальта, поэтому его температура на термограмме кажется более низкой. Также стоит обратить внимание на окна: так как обычное стекло не пропускает ИК излучение в диапазоне измерения тепловизора, измерить его реальную температуру с помощью тепловизора не представляется возможным.

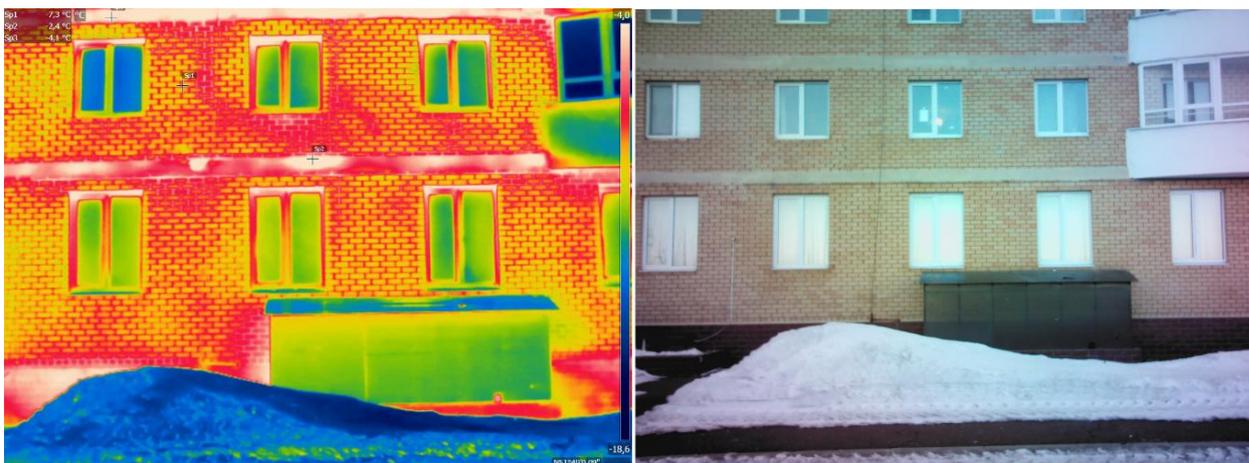
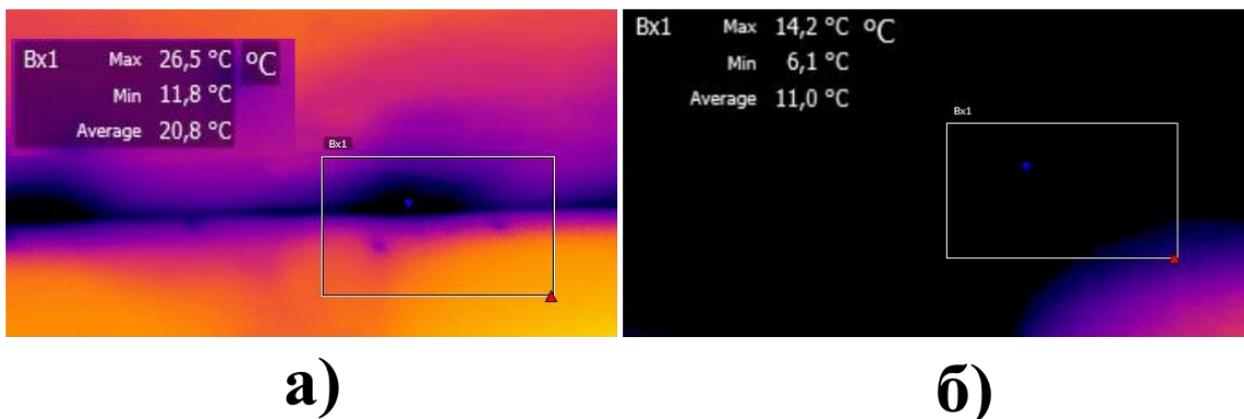


Рисунок 8.2 – Иллюстрация влияния свойств теплового испускания на термограмму

Для того, чтобы иметь возможность оценить, насколько оптические свойства реальных материалов отличаются от свойств абсолютно черного тела применяют коэффициенты отражения, пропускания и излучения электромагнитных волн. Наиболее часто в термометрии применяется коэффициент излучения, показывающий насколько излучение материала меньше излучения абсолютно черного тела при той же температуре. Коэффициент излучения существенно влияет на результат термографирования. На рисунке 8.3 показаны тепловые картины для коэффициентов излучения 0,5 (рисунок 8.3, а) и 1 (рисунок 8.3, б) Средняя температура в области отличается почти на 10 градусов.



а) коэффициент излучения 0,5; б) коэффициент излучения 1.

Рисунок 8.3 – Иллюстрация влияния коэффициента излучения на тепловизионную картину

Как правило, тепловизор позволяет изменять коэффициент излучения в процессе термографирования, либо уже после съемке, при обработке термограмм. При этом, значения коэффициентов для наиболее часто встречающихся материалов могут быть встроены в тепловизор. Их численные значения приведены в таблице 8.1. Вопрос экспериментального определения коэффициента излучения будет рассмотрен в практической части работы.

Таблица 8.1 – Коэффициенты излучения

Материал поверхности	Коэффициент излучения (степень черноты) - $\varepsilon$ -
Алюминиевый лист	0.09
Асфальт	0.93
Бумага офисная	0.55
Бетон	0.85
Бетонные плитки	0.63
Вода	0.95 - 0.963
Гипс	0.98
Дерево - Дуб	0.91
Гранит	0.45
Гипс	0.85
Железо полированное	0.14 - 0.38
Железо, пластина покрытая красной ржавчиной	0.61
Железо, темно-серая поверхность	0.31
Железо, грубый слиток	0.87 - 0.95
Красный кирпич	0.9
Кирпич, огнеупорная глина	0.75
Мрамор белый	0.95
Пластмассы	0.91
Полость черного тела	1.00
Полированная медь	0.023 - 0.052
Сталь нержавеющая	0.85

Тепловизионное обследование является эффективным средством контроля качества теплозащиты зданий. Оно проводится при наличии установившегося перепада температур наружного воздуха и воздуха в помещениях. В ходе тепловизионного обследования регистрируются температурные поля на обследуемых поверхностях ограждающих конструкций зданий.

Проведение тепловизионной съемки наружной и внутренней поверхностей ограждающих конструкций, позволяет получить термограммы – двухмерные изображения обследованных поверхностей, где яркость или цвет соответствует значению температуры, определяемому температурной шкалой термограммы. Анализ термограмм внутренних и наружных поверхностей ограждающих конструкций совместно с результатами измерений метеоусловий и температуры

воздуха в помещениях при наличии проектной документации на обследуемые ограждающие конструкции позволяет выявить дефекты их теплоизоляции.

Тепловизионное обследование ограждающих конструкций проводится по методике ГОСТ Р 54852-2011 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций», в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003», с целью контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций и проверки их на наличие скрытых дефектов.

## **8.2 Методика проведения внутренней и наружной тепловизионной съемки**

### **8.2.1. Подготовка к измерениям**

Перед началом тепловизионной съемки ГОСТ Р 54852-2011 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций» предписывает убедиться в соблюдении следующих условий:

– температурный перепад между внутренним и наружным воздухом превышает минимально допустимый перепад, определяемый по формуле:

$$\Delta t_{\min} = 2 \cdot \Delta \theta \cdot R_0^n \cdot \frac{\alpha \cdot r}{1 - r}, \quad (8.1)$$

где  $\Delta \theta$  – предел температурной чувствительности тепловизора, °С;

$R_0^n$  – проектное значение сопротивления теплопередаче, °С·м<sup>2</sup>/Вт;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи. Для внутренних поверхностей принимается по нормативно-технической документации. Для наружных поверхностей принимается в зависимости от скорости ветра равным 11; 20; 30 °С·м<sup>2</sup>/Вт для скоростей ветра 1; 3; 6 м/с соответственно.

В большинстве случаев для проведения тепловизионного обследования достаточно перепада в 10-15 °С, но чем выше температурный перепад, тем детальнее и информативнее получаются термограммы.

– температурный режим обследуемого объекта является стационарным. Для этого необходимо, чтобы обследуемые поверхности не находились под прямыми или отраженными солнечными лучами в течение 12 часов до проведения тепловизионной съемки. Оконные и дверные проемы также должны быть зафиксированы в стационарном состоянии в течение 12 часов до и во время тепловизионной съемки.

– тепловизионное обследование не рекомендуется проводить в условиях сильного ветра (более 6 м/с), дождя и тумана, так как эти метеорологические факторы вносят искажение в тепловизионную картину.

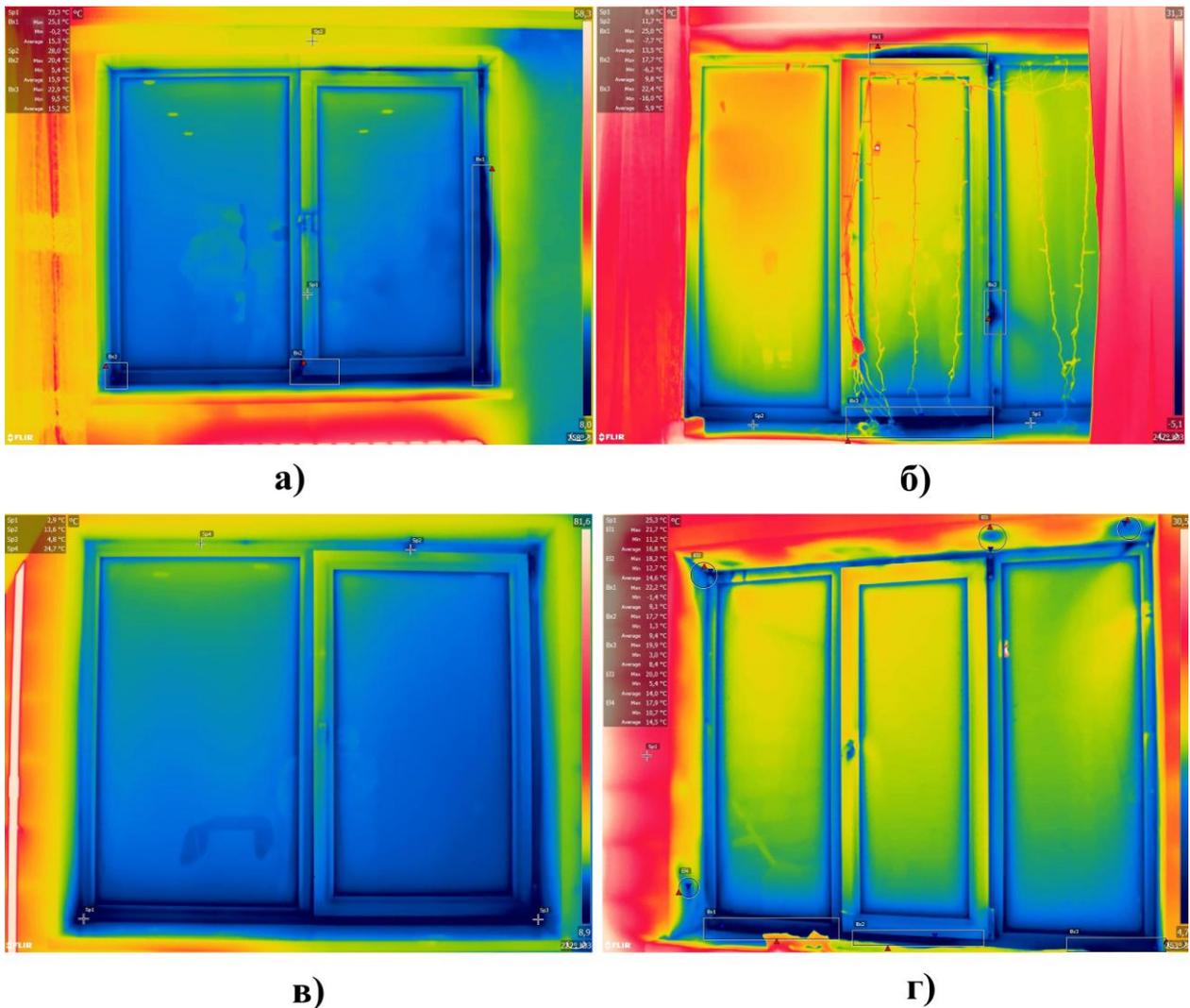
#### 8.2.2. Проведение тепловизионного обследования

Перед началом измерений, и в процессе измерений измеряют температуру и влажность наружного и внутреннего воздуха, а также скорость ветра. Результаты измерений записываются в журнал с периодичностью в 15-30 минут.

На тепловизоре подбирается коэффициент излучения, соответствующий материалу исследуемых конструкций. Съёмка производится под углом не более 60°. Для термографирования удаленных объектов (высокие этажи), желательно увеличить расстояние до объекта термографирования с целью увеличения угла обзора тепловизора. Для выявления точек повышенных теплопотерь проводится обзорное термографирование, затем в местах с обнаруженным дефектами проводят детальную съемку.

При проведении внутренней тепловизионной съемки необходимо обращать внимание на следующие объекты:

– оконные конструкции и балконные двери. В оконных конструкциях возможны следующие дефекты: некачественный монтаж окон, который проявляется в виде низкой температуры по периметру рамы окна (рисунок 8.4, а); неплотное прилегание уплотнителей (рисунок 8.4, б), отсутствие герметизации стыка окна и откоса (рисунок 8.4, в) и недостаточное утепление откосов (рисунок 8.4, в).



- а) некачественный монтаж; б) неплотное прилегание уплотнителей
- в) недостаточное утепление стыка окна и откоса;
- г) некачественное утепление откосов.

Рисунок 8.4 – Возможные дефекты в оконных конструкциях

–угловые части наружных стен помещения. Наиболее часто теплопотери происходят через места примыкания конструкционных плит здания. Примеры дефектов показаны на рисунке 8.5.

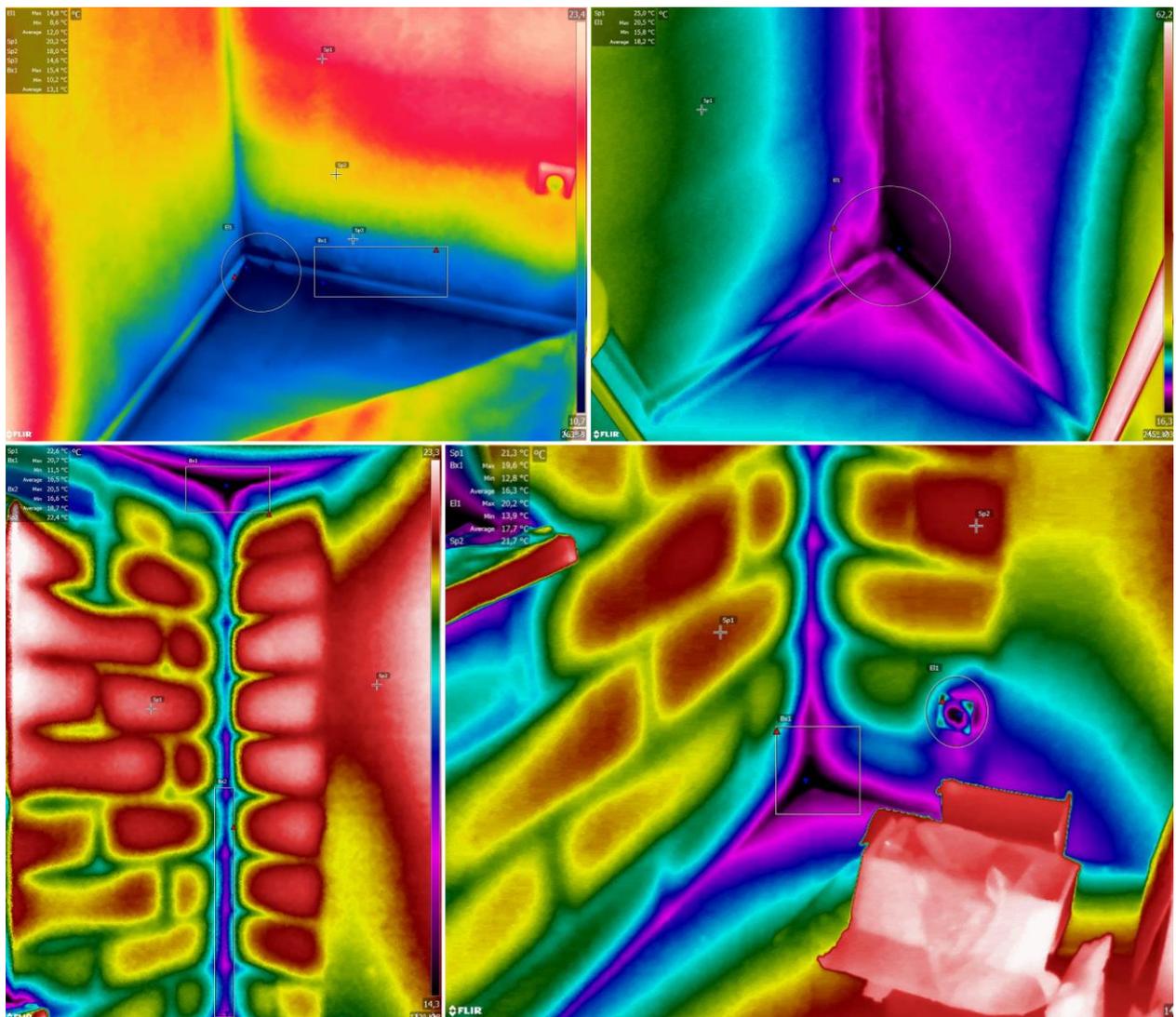
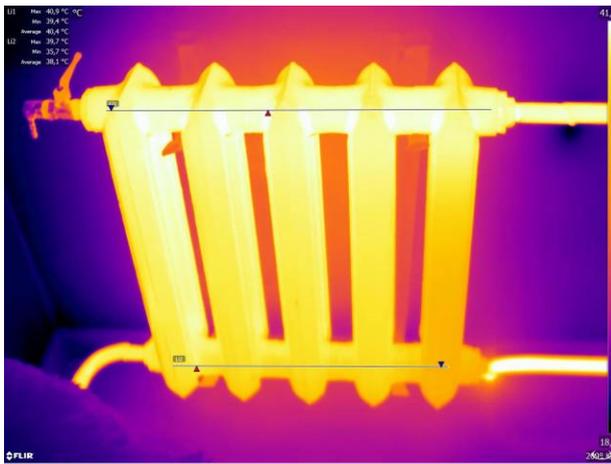
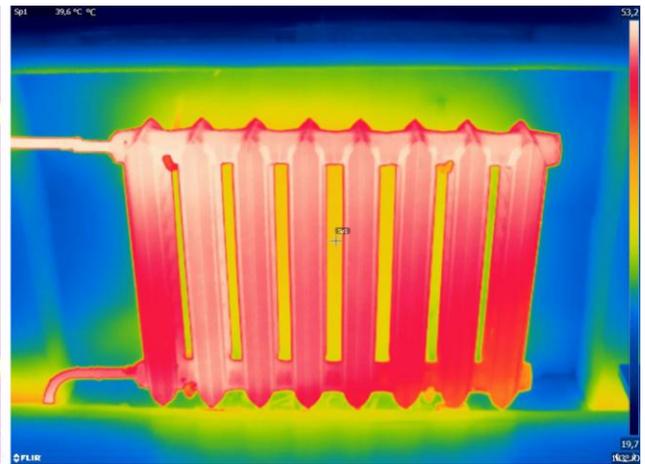


Рисунок 8.5 – Примеры дефектов угловой части стен

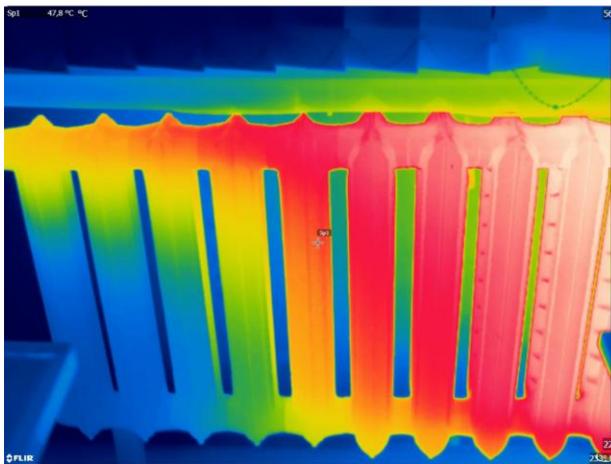
– отопительные приборы. Термографирование позволяет легко выявить засоренность и завоздушенность отопительных приборов в помещении.



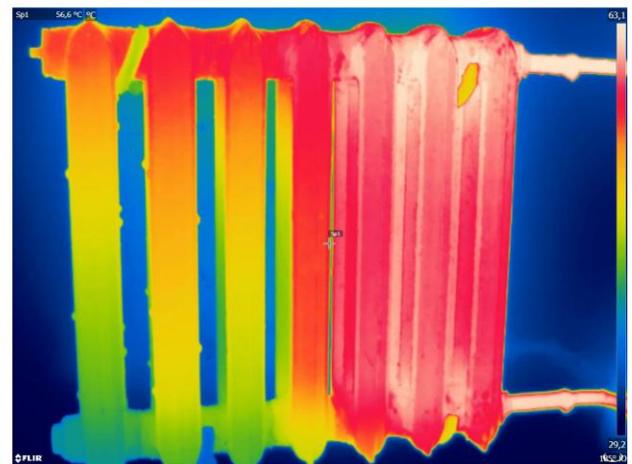
а)



б)



в)



г)

а,б) исправные отопительные приборы;

в,г) засоренные или завоздушенные отопительные приборы.

Рисунок 8.4 – Термограммы отопительных приборов

При проведении наружной тепловизионной съемки в первую очередь необходимо обращать внимание на те области, которые при внутренней съемке были более холодными. Также стоит обращать внимание на стыки плит здания, его цокольную часть и места, в которых видны визуальные дефекты ограждающих конструкций. При этом необходимо помнить, что области с повышенной температурой могут соответствовать местам установки отопительных приборов (как правило области под окнами). Примеры приведены на рисунках 8.5-8.7.

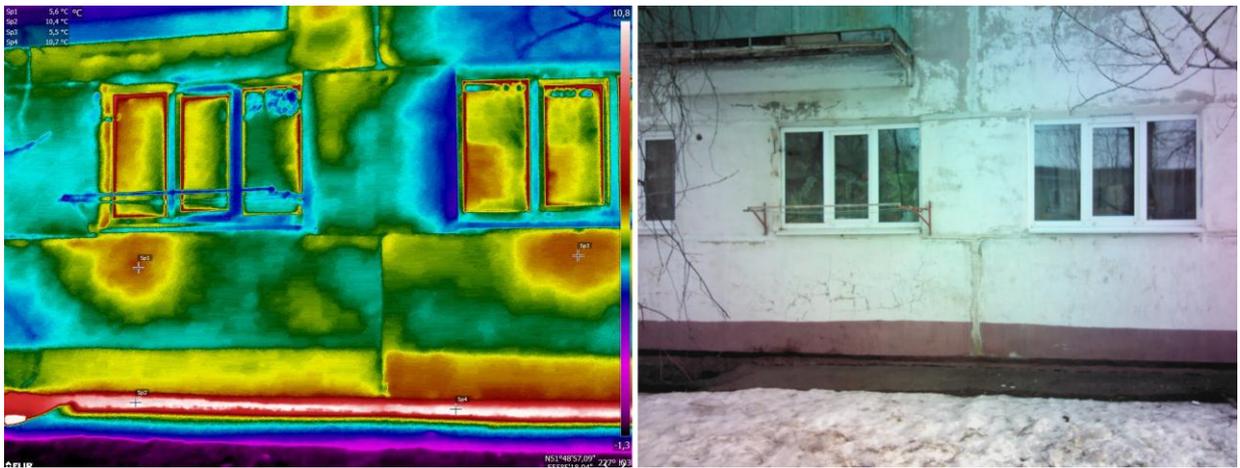


Рисунок 8.5 – Теплопотери через цокольную часть здания

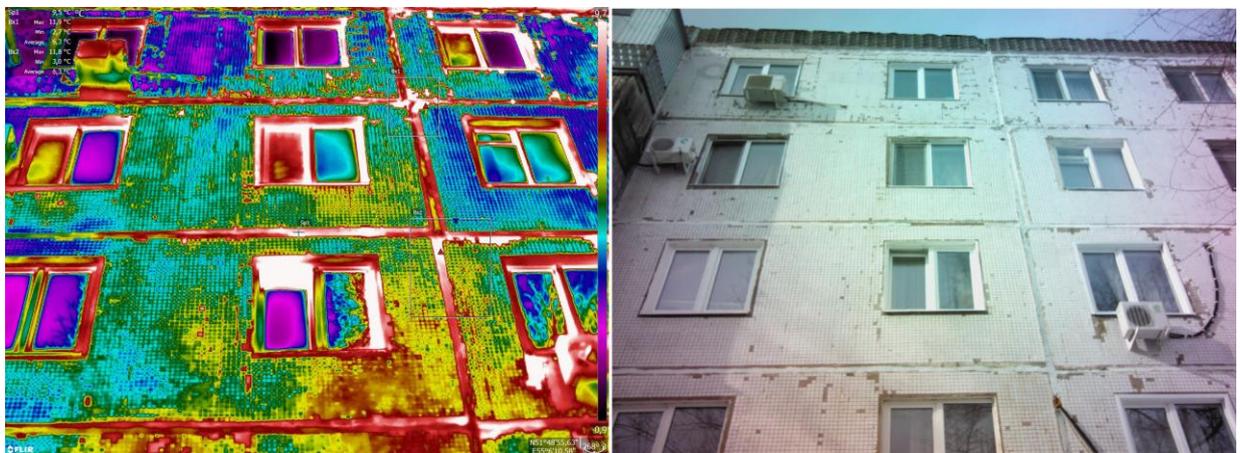


Рисунок 8.6 – Теплопотери через межплитные швы

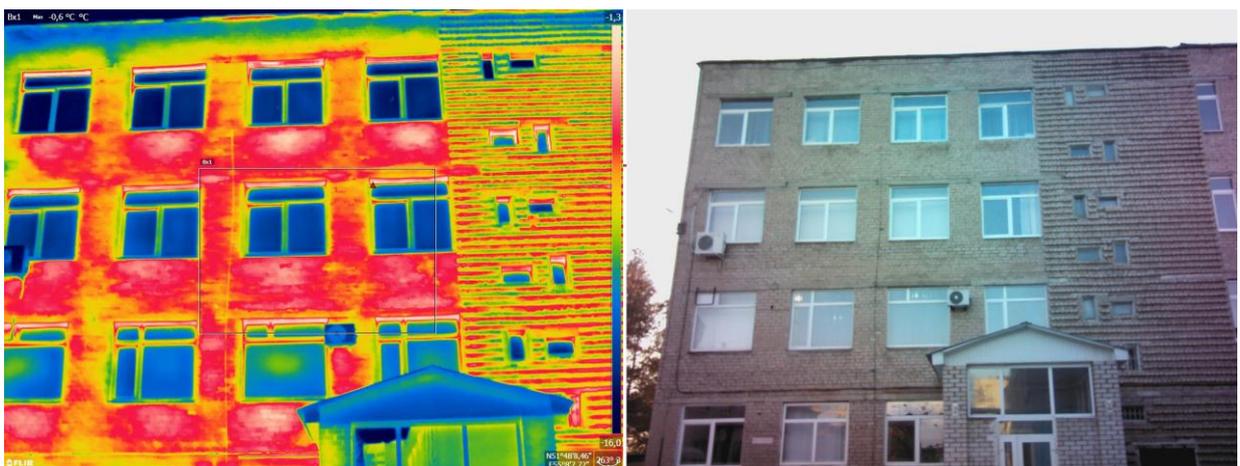


Рисунок 8.7 – Области с повышенной температурой в местах установки отопительных приборов

Осмотр объекта контроля с помощью тепловизора может быть проведен без выбора геометрического репера. Осмотр выполняют с целью создания общей характеристики качества теплоизоляции и выявления мест для последующего детального термографирования. Результаты, получаемые в ходе осмотра объекта, считаются лишь предварительными и не могут быть самостоятельно использованы для анализа наблюдаемых дефектов.

В процессе осмотра, если планируется дальнейшее обзорное и/или детальное термографирование, выбирают также реперные и базовый участки, которые любым доступным способом отмечают непосредственно на ограждающей конструкции или на ее плане. За базовый принимают участок ограждающей конструкции, линейные размеры которого превышают две толщины, имеющий равномерное температурное поле. При внешней съемке в отопительный период температура базового участка должна быть близкой к минимальной температуре на поверхности ограждающей конструкции, а при внутренней съемке - к максимальной температуре. За реперные участки принимают области с постоянными температурами, существенно отличающимися от температур других областей поверхности. Размер реперного участка при заданной дистанции съемки должен превышать наименьший линейный размер. В качестве одного из реперных участков можно использовать базовый участок, а в качестве других допускается использовать участки с потенциальными дефектами.

Тепловизор устанавливают на выбранном месте, включают и настраивают в соответствии с инструкцией по его эксплуатации.

Выбирают реперные и базовый участки перед каждым термографированием.

Для привязки реперных участков к термограммам объект контроля фотографируют с отмеченными участками или наклеивают рядом на бездефектной области металлизированную пленку.

Непосредственно перед началом и после термографирования измеряют температуру и влажность внутреннего и наружного воздуха термогигрометром и регистрируют значения в журнале.

В процессе обследования контролируют температуру наружного воздуха с частотой не менее одного раза в 15-30 мин, результаты заносят в журнал.

При наружном обследовании измеряют скорость ветра вблизи поверхности ограждающей конструкции, результаты заносят в журнал.

Перед или после каждой термографической съемки с записью термограммы измеряют температуру в выбранных точках на реперных участках. Результаты измерений заносят в журнал.

В процессе термографической съемки каждому снятому кадру присваивают номер, который с комментариями заносят в журнал. Допускается параллельное фотографирование участков поверхности.

Если предполагается объединение термограмм для получения панорамных снимков, термографирование проводят с перекрытием не менее 10% каждой соседней термограммы.

Если в процессе обзорного термографирования были обнаружены участки с нарушениями теплозащиты, не замеченные в ходе проведения осмотра, рекомендуется провести повторное детальное термографирование таких участков.

Все угловые стыки наружных и внутренних поверхностей ограждающих конструкций (стен, потолка, пола, карнизов, сопряжений с землей и др.) рекомендуется подвергать дополнительному детальному термографированию.

В случае необходимости дальнейшей компьютерной обработки термограмм для получения точных количественных данных по измеренным температурам перед началом и после проведения обследований рекомендуется проводить измерение радиационной температуры неба под разными углами с помощью тепловизора или пирометра.

### 8.2.3. Обработка полученных термограмм

Обработку термограмм проводят для получения, записанного в цифровом виде теплового изображения распределения температуры на поверхности ограждающей конструкции с более высокой точностью, чем это может быть выполнено при тепловизионной съемке. Неточности тепловизионной съемки могут

быть вызваны неточностями задания коэффициента излучения поверхности, учета температуры отраженного излучения, учета поглощения излучения воздушной средой, погрешностями калибровки тепловизора и другими факторами. Целью обработки термограмм является переход от радиационных температур, регистрируемых тепловизором, к истинным температурам поверхности. Обработка термограмм не является способом оценки дефектности ограждающей конструкции и качества теплоизоляции.

Обработку термограмм проводят либо программными средствами непосредственно тепловизора, либо с помощью ЭВМ путем математической обработки записанного в оцифрованном виде теплового изображения.

Обработка термограмм с помощью ЭВМ не требуется, если полученные с помощью тепловизора значения температур в реперных участках совпадают с температурами, измеренными контактным методом.

Обработку термограммы считают завершенной, если полученные в ходе пересчета значения температуры на реперных участках в рамках приборной погрешности совпадают с измеренными значениями, а также учтено влияние на регистрируемую температуру изменения коэффициента излучения по области термограммы.

Обработку термограмм не проводят или проводят в упрощенном виде, если термографирование выполняют на качественном уровне, т.е. определяют участки поверхности с различными температурами, сравнение которых служит основанием для вынесения решения о наличии дефектности теплоизоляции.

Если термографирование проводят на количественном уровне, т.е. необходимо получение максимально точных значений распределения температур на поверхности для проведения расчетов тепловых потерь и повышения достоверности оценок причин и степени нарушения теплоизоляции, то обработка термограмм является обязательной.

Информацию о проведенной обработке термограмм, способах обработки и полученных результатах по коррекции температур в обнаруженных зонах с

анормальными температурами приводят в отчете о термографическом обследовании.

Упрощенная обработка термограмм проводится путем сдвига шкалы температуры на величину, равную разности между измеренной и зарегистрированной тепловизором температурами на реперном участке или настройкой параметров тепловизора при съемке. К таким параметрам относятся: коэффициент излучения поверхности, температура отраженного излучения, температура окружающей среды, удаленность точки съемки и влажность воздуха.

На обработанных термограммах допускается присутствие участков, температура которых отличается от действительной. О наличии таких участков должно быть указано в отчете о термографическом обследовании с указанием причины возможных отличий. Данные участки последующему анализу не подлежат.

Обработка термограмм сводится к пересчету измеренных значений температур во всех точках термограмм с учетом калибровочной зависимости тепловизора, влияния таких факторов, как наличие и температура отраженного излучения, коррекция величины коэффициента излучения, степень пропускания регистрируемого излучения воздушной средой на пути между тепловизором и объектом, температура окружающего воздуха и его относительная влажность.

Одним из наиболее продвинутых инструментов обработки термограмм является программа Flir Tools [6], имеющая множество возможностей по редактированию тепловизионных изображений. Рассмотрим основные шаги обработки термограмм.

#### 1 Выставление коэффициента излучения материала.

Коэффициент излучения, как правило, выставляется исходя из превалирующего материала ограждающей конструкции, либо того места, которое термографируется. Flir Tools также позволяет задать локальный коэффициент излучения для квадратной или круглой области: для этого необходимо выделить интересующий участок в отдельную область и нажатием правой кнопки мыши задать в ней локальные параметры (рисунок 8.8).

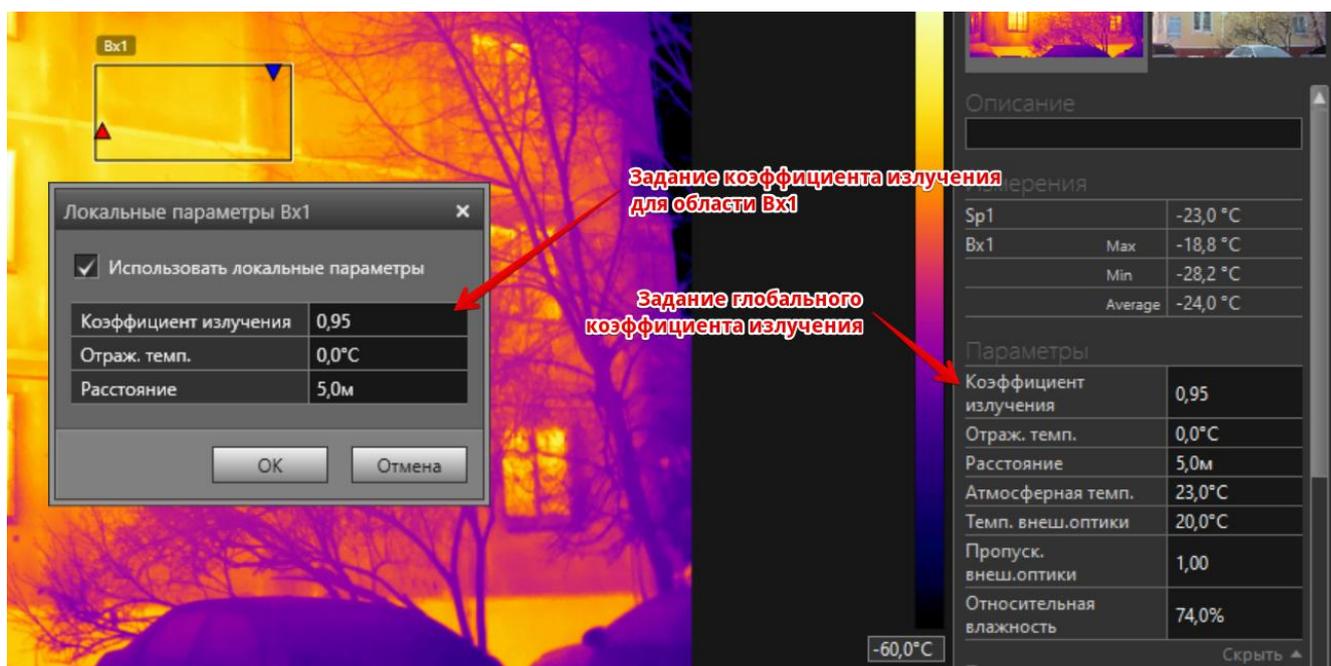


Рисунок 8.8 – Задание коэффициента излучения

## 2 Выбор цветовой палитры.

Flir Tools позволяет представить термограмму в одной из 6 цветowych палитр (рисунок 8.9).

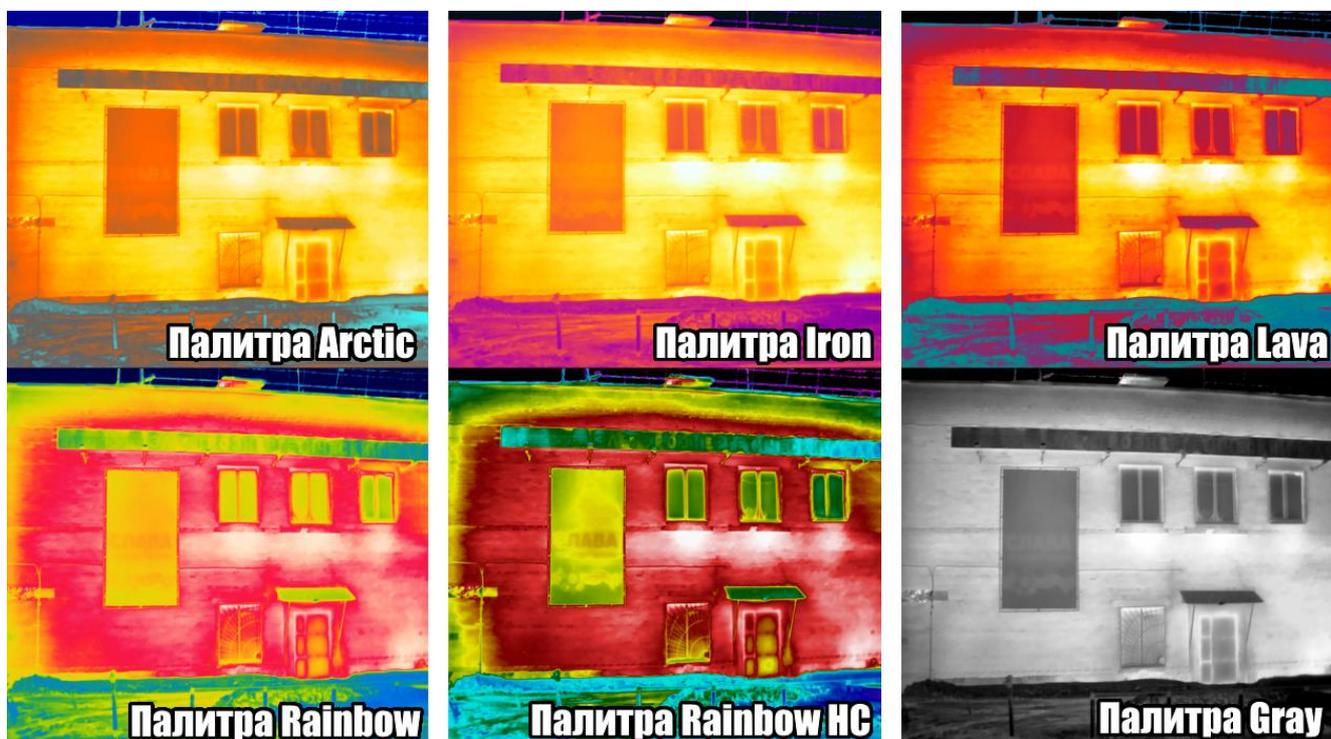


Рисунок 8.9 – Палитры Flir Tools

Для поиска мест утечек тепла и наглядного представления результатов термографирования предпочтительно использование палитр Rainbow и Rainbow HC – эти палитры позволяют лучше всего различать области с незначительными отличиями температуры, либо выделить области с резкими отличиями температуры. Однако при небольших температурных перепадах указанные палитры могут исказить восприятие термограммы. Например, на рисунке 8.10, фиолетовая область кажется областью с очень низкой температурой, хотя на самом деле, все температуры на ней находятся в допустимых пределах. Искажение происходит из-за большой разницы между температурой стены и температурой стены.

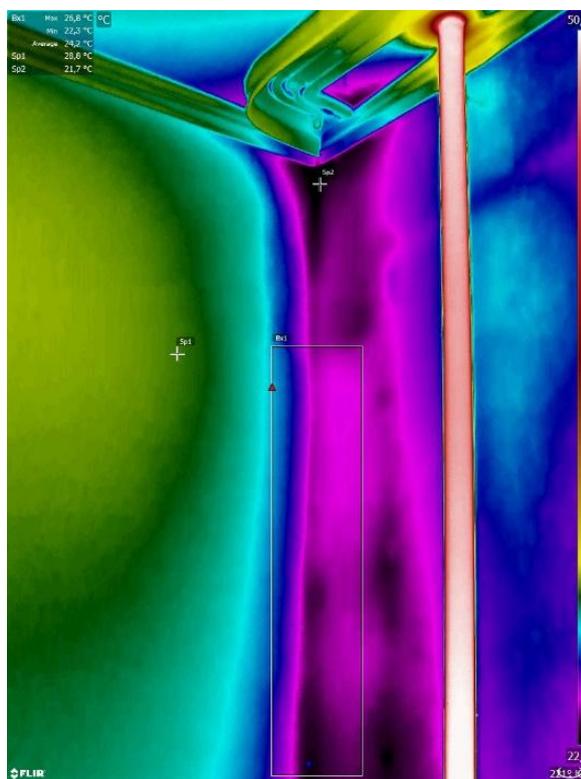


Рисунок 8.10 – Искажение восприятия термограммы

### 3 Выделение опорных точек и проблемных областей.

Flir Tools позволяет выбрать на термограмме не только отдельную точку измерения температуры, но также выделить квадратную/овальную область или произвести линейное измерение (рисунок 8.11). В выделенных областях отмечаются точки с максимальной/минимальной температурой, что облегчает поиск дефектных областей. Также для области высчитывается средняя температура и доступно задание локального коэффициента излучения.

Линейное измерение может быть удобно для определения изменения температуры вдоль какой-либо поверхности, например, при анализе работоспособности отопительных приборов или определении температурных перепадов. При обработке термограмм рекомендуется выделять подобным образом проблемные места. Также рекомендуется устанавливать точечные измерения в опорных точках каждого цвета, так как это облегчает интерпретацию термограммы.

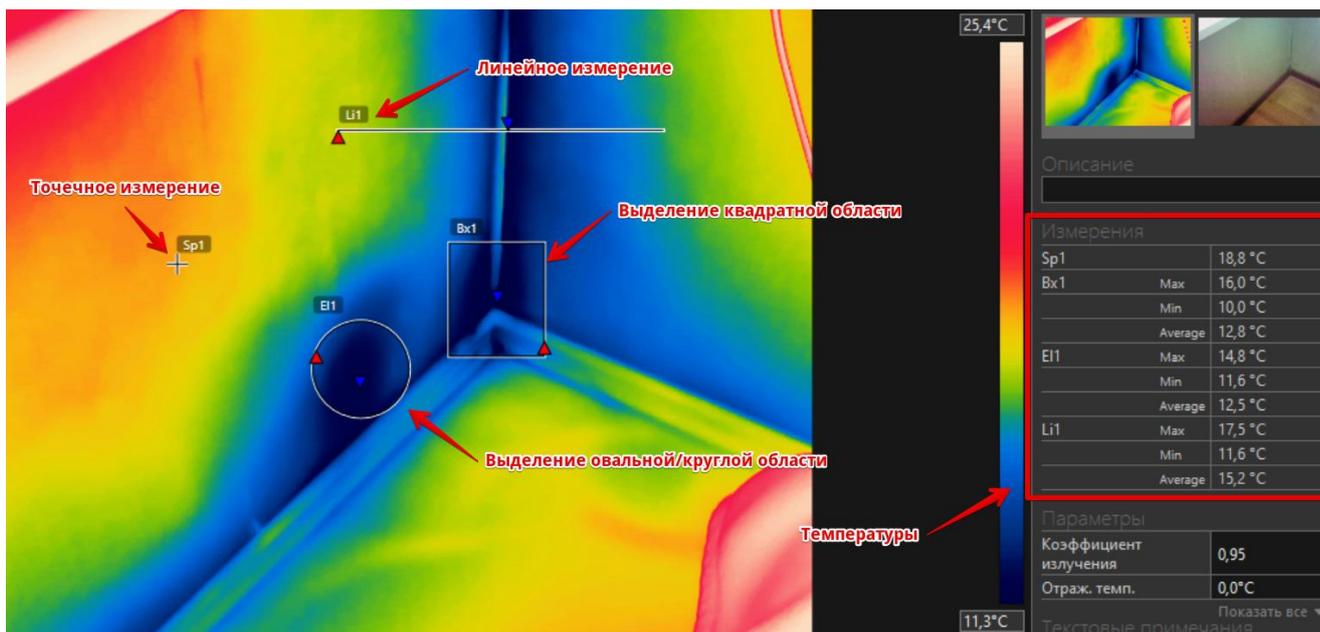


Рисунок 8.11 – Задание точек и областей измерения

#### 4 Выделение областей на термограмме.

Flir tools также обладает инструментом «Изотерма», очень удобным для выделения проблемных областей. Изотерма «Выше» позволяет выделить на термограмме только те области, температура которой выше заданной (рисунок 8.12). Использование этого инструмента особенно удобно при анализе термограмм фасадов зданий.

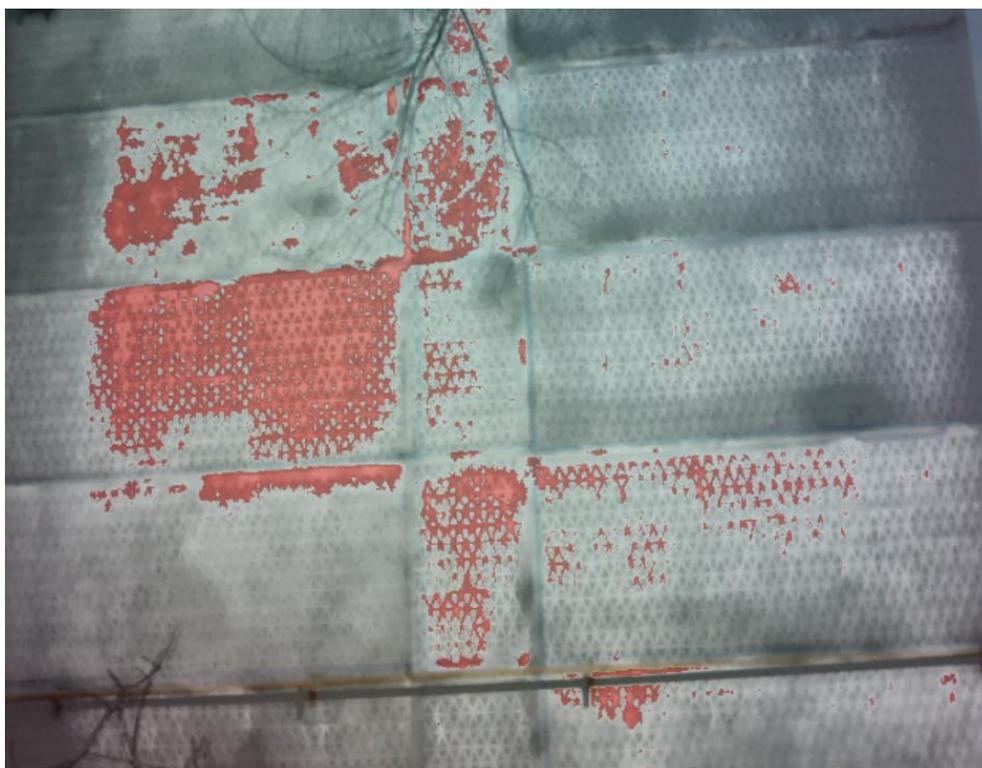


Рисунок 8.12 – Изотерма "Выше"

Изотерма «Ниже» выделяет области с температурой ниже заданной. Этот инструмент наоборот, удобен при анализе термограмм внутренней тепловизионной съемки (рисунок 8.14).



Рисунок 8.14 – Изотерма «Ниже»

Еще одним удобным инструментом для обработки результатов внутренней тепловизионной съемки является изотерма «Влажность», выделяющая области, температура в которых ниже температуры точки росы. Но для ее корректной работы необходимо указание влажности воздуха и температуры в помещении (рисунок 8.15).



Рисунок 8.15 – Изотерма «Влажность»

### 8.3 Практическая часть лабораторной работы

#### 8.3.1 Определение коэффициентов излучения материала

При практическом проведении тепловизионной съемки нередко встречаются материалы, значения коэффициентов излучения которых отсутствуют во встроенной памяти тепловизора. Также даже для одного материала коэффициент излучения может существенно отличаться в зависимости от состояния его поверхности. В связи с этим, зачастую возникает необходимость в практическом измерении коэффициента излучения материала. Для этого помимо тепловизора применяется эталонный контактный термометр, с помощью которого возможно определение реальной температуры в любой точке исследуемой поверхности.

Для определения реального коэффициента излучения материала необходимо проделать следующие действия.

1 Получить у преподавателя задание. Коэффициент излучения может быть определен для материала стен аудитории, лабораторных стендов, поверхности столов и прочих окружающих предметов.

2 На поверхности предмета определить реперную точку, температура которой будет стабильна во времени. Желательно, чтобы указанная точка не подвергалась нагреву от внешних тепловых источников (батареи отопления, солнечные лучи и так далее).

3 С помощью контактного термометра определить реальную температуру реперной точки. Для этого необходимо, чтобы щуп контактного термометра находился в тепловом балансе с объектом измерения. Для обеспечения этого условия необходимо выждать, пока показания термометра не останутся на одном значении. Измерение производить в течение времени не менее 5 минут для исключения ошибок измерения.

4 Навести точку измерения тепловизора на реперную точку, температура которой известна. Путем подстройки коэффициента излучения в настройках тепловизора добиться совпадения температуры, которую показывает тепловизор с температурой, которую показывает контактный термометр.

5 Записать полученное значение коэффициента излучения для исследуемой поверхности.

### 8.3.2 Обработка термограмм и составление отчета.

Основной частью тепловизионной съемки является обработка результатов и формулировка выводов по обследуемым поверхностям, а также рекомендаций по снижению тепловых потерь. Для выполнения этой части лабораторной работы необходимо выполнить следующие действия.

1 Получить у преподавателя набор термограмм и сведения об объекте термографирования (температура воздуха, влажность, скорость ветра).

2 Установить на компьютер программу Flir Tools.

3 Произвести обработку термограмм с учетом указаний, приведенных в теоретической части работы.

4 На основе полученных результатов сформулировать рекомендации по улучшению теплового режима объекта и уменьшению потерь тепловой энергии.

#### **8.4 Контрольные вопросы**

1 Принцип работы тепловизора.

2 Физический смысл коэффициента излучения и его влияние на результаты термографирования.

3 Необходимые условия для проведения тепловизионной съемки.

4 Алгоритм определения коэффициента излучения материала.

5 Последовательность обработки термограммы.

## Список использованных источников

- 1 Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – Москва: ЭНАС, 2009. – 456 с.
- 2 РД 34.09.254 «Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений. И 34-70-02886». – М: СПО Союзтехэнерго, 1987.
- 3 Мероприятия по снижению потерь электроэнергии: структура, перечень [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pue8.ru/uchet-elektroenergii/meropriyatiya-po-snizheniyu-poter-elektroenergii-struktura-meropriyatij.html>. – 24.05.2021
- 4 Герасимов, С. Е. Регулирование напряжения в распределительных сетях. учебное пособие / С. Е. Герасимов, А. Г. Меркурьев. – Санкт-Петербург: СПб.: Центр подготовки кадров СЗФ АО «ГВЦ Энергетики», 1998. –76 с.
- 5 Стрельников, Н. А. Энергосбережение: учебник / Н. А. Стрельников. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 176 с.
- 6 Программа для анализа термограмм [Электронный ресурс]. – FLIR Instrument Customer Support Center. – Режим доступа: <http://support.flir.com/SwDownload/app/RssSWDownload.aspx?ID=1247>.
- 7 Соединение звездой и треугольником обмоток электродвигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zametkielectrika.ru/soedinenie-zvezdoj-i-treugolnikom/>