

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»

М.Р.Каткова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ**

Практикум

Рекомендовано методической комиссией физического факультета
для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки
03.03.02 «Физика», 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»,
09.03.02 «Информационные системы и технологии»

Нижний Новгород

2020

УДК 53

ББК 22.3

Исследование превращения электрической энергии в тепловую: практикум. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2019. –14 с.

Автор: к.ф.-м.н., доцент Каткова М.Р.

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент Тележников А.В.

Данный практикум посвящен изучению особенностей превращения электрической энергии в тепловую. Определяется коэффициент полезного действия нагревателя.

Учебно-методические указания предназначены для студентов 2 курса физического факультета.

Ответственный за выпуск:
председатель методической комиссии
физического факультета ННГУ, к.ф.-м.н., доцент Перов А.А.

УДК 53
ББК 22.3

Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского,
2020

Цель работы – ознакомиться с законом Джоуля - Ленца в интегральной и дифференциальной формах; определить коэффициент полезного действия электрического нагревателя.

Теоретическая часть

Электрический ток. Интегральная и дифференциальная формы закона Ома

Электрический ток – это направленное движение заряженных частиц, при котором происходит перенос заряда из одних областей пространства в другие. Электрический ток может возникать в самых различных средах: твердых телах, жидкостях, газах.

О возникновении электрического тока можно судить по следующим его проявлениям:

- *тепловому действию тока* (электрический ток вызывает нагревание вещества, в котором он протекает);
- *магнитному действию тока* (электрический ток создает магнитное поле: стрелка компаса, расположенная рядом с проводом, при включении тока поворачивается перпендикулярно проводу);
- *химическому действию тока* (при прохождении тока через электролиты можно наблюдать изменение химического состава вещества).

Количественной характеристикой электрического тока является сила тока

$$I=dq/dt, \tag{1}$$

где dq – заряд, переносимый за малый интервал времени dt . Единицей силы тока является ампер.

Для детальной характеристики тока вводят вектор плотности тока j . Модуль вектора j равен отношению силы тока dI через элементарную площадку dS , расположенную перпендикулярно направлению движения носителей, к ее площади

$$j=dI/dS. \tag{2}$$

За направление вектора \mathbf{j} принимается направление скорости упорядоченного движения положительных носителей либо направление, противоположное скорости упорядоченного движения отрицательных носителей.

В 1825 году Георг Ом экспериментально установил, что сила тока, протекающего по однородному проводнику, пропорциональна напряжению U на его концах

$$I=U/R, \quad (3)$$

где R – электрическое сопротивление проводника.

В изотропной проводящей среде упорядоченное движение положительных носителей происходит в направлении вектора напряженности поля \mathbf{E} . Направления векторов \mathbf{j} и \mathbf{E} совпадают. Вместо закона Ома в интегральной форме (3) можно записать соотношение, получившее название дифференциальной формы закона Ома,

$$\mathbf{j}=\sigma \mathbf{E}, \quad (4)$$

где σ - удельная электропроводность среды.

Закон Джоуля – Ленца

Если электрический заряд dq переместился из одной точки электрического поля в другую с разностью потенциалов (напряжением) U , то поле совершило работу

$$\delta A=dq U. \quad (5)$$

Если нет химических реакций, и проводник с током не перемещается, то вся работа тока переходит в теплоту

$$\delta A=\delta Q. \quad (6)$$

Из (1) следует, что за время dt при силе тока I проходит заряд $dq=I dt$, тогда

$$\delta Q=IU dt. \quad (7)$$

Если на участке цепи выполняется закон $U=IR$, то

$$\delta Q=I^2 R dt. \quad (8)$$

Теплота, выделяемая в единицу времени, называемая тепловой мощностью, запишется

$$\delta Q/dt = I^2 R. \quad (9)$$

Формула (9) выражает закон Джоуля - Ленца в интегральной форме.

Дифференциальная форма этого же закона определяет количество теплоты, выделяющееся за единицу времени в единице объема проводящей среды – удельную тепловую мощность тока. Если на носители тока действуют только электрические силы, то на основании закона Ома (4) запишем

$$Q_{y\partial} = \sigma E^2. \quad (10)$$

Наиболее общая форма закона Джоуля – Ленца, применимая к любым проводникам вне зависимости от их формы, однородности и от природы сил, возбуждающей электрический ток, имеет следующий вид

$$Q_{y\partial} = \rho j^2, \quad (11)$$

где $\rho = 1/\sigma$ – удельное электрическое сопротивление, зависящее от материала и температуры. Выражения (9), (10), (11) справедливы для постоянного и переменного тока.

Если электрический ток изменяется по гармоническому закону $I = I_m \cos(\omega t)$, где I_m – амплитуда, ω – циклическая частота, то для такого тока закон Джоуля - Ленца имеет вид

$$\delta Q/dt = R I_m^2 \cos^2(\omega t). \quad (12)$$

Так как среднее за период значение квадрата косинуса равно 1/2, то часто интересуются средней тепловой мощностью

$$(\delta Q/dt)_{cp} = R I_m^2 / 2. \quad (13)$$

Такую же мощность развивает постоянный ток, сила которого равна

$$I_{эфф} = I_m / \sqrt{2}. \quad (14)$$

Величина $I_{эфф}$ называется эффективным (действующим) значением силы переменного тока. Аналогично вводится эффективное (действующее) значение напряжения

$$U_{эфф} = U_m / \sqrt{2}. \quad (15)$$

Тогда средняя тепловая мощность переменного тока равна

$$(\delta Q/dt)_{cp} = RI_{эфф}^2. \quad (16)$$

Двухполупериодный выпрямитель

Для выполнения данной работы нам необходим источник постоянного тока. Чтобы получить из переменного тока постоянный ток, нам необходимо воспользоваться специальным устройством - *выпрямителем*. Действие любого выпрямителя основано на возможности создания элементов электрической цепи, пропускающих ток только в одном определенном направлении. В качестве выпрямителя можно использовать полупроводниковые диоды.

Однополупериодное выпрямление – ток в цепи проходит только в течение половины каждого периода, при включении диода в цепь с переменным синусоидальным напряжением (рис.1). Ток, протекающий через резистор R , является постоянным лишь по направлению, а сила тока не постоянна. В течение одного полупериода она возрастает до максимального значения, а затем убывает до нуля.

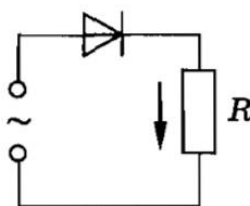


Рис.1. Схема включения диода в цепи с переменным синусоидальным напряжением.

В течение всего второго полупериода сила тока равна нулю, затем снова возрастает и убывает. Такой ток называется *пульсирующим*.

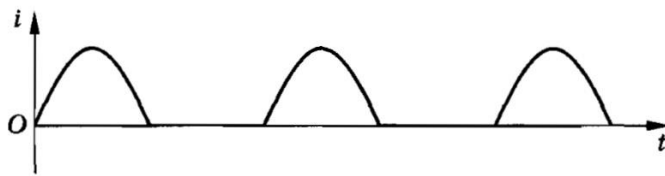


Рис.2. Зависимость силы тока от времени при однополупериодном выпрямлении.

Двухполупериодное выпрямление. Схемы двухполупериодного выпрямления применяют при использовании обоих полупериодов переменного тока. Это реализуется в мостовой схеме рис.3.

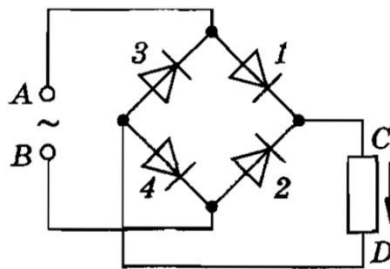


Рис.3. Мостовая схема.

Когда потенциал клеммы А источника переменного напряжения положителен, а клеммы В – отрицателен, то ток протекает через диоды 1 и 4 (рис. 4 а). Диоды 2 и 3 при этом заперты, а цепь в этих местах практически разомкнута. Через половину периода потенциал клеммы А становится отрицательным, а клеммы В – положительным. Теперь уже заперты диоды 1 и 4, и ток пропускают через диоды 2 и 3 (рис.4 б).

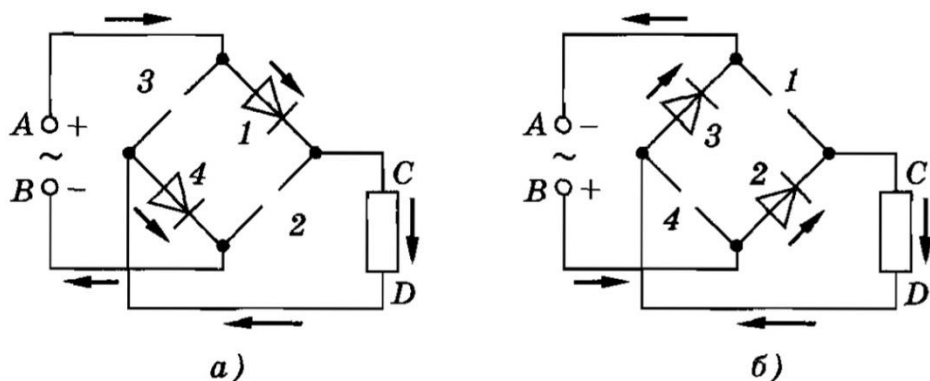


Рис.4. Схемы с использованием двухполупериодного выпрямления.

Через нагрузку ток в течение обоих полупериодов проходит в одном и том же направлении: от С к D. Хотя и теперь сила тока непрерывно изменяется: после выпрямления ток также оказывается пульсирующим (рис. 5).

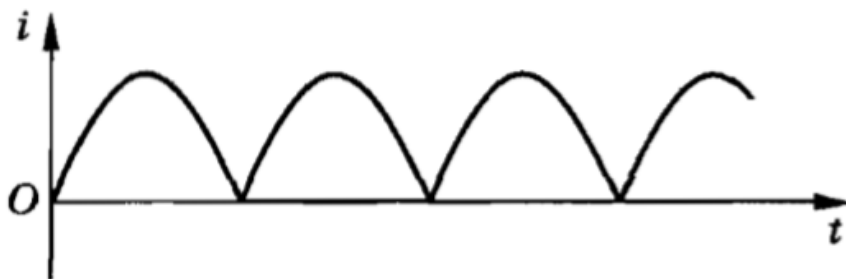


Рис.5. Зависимость силы тока от времени при использовании двухполупериодного выпрямителя.

Сглаживающие фильтры

Источник питания, используемый в данной работе (LD 52135) содержит лишь трансформатор и двухполупериодный выпрямитель. На выходе данного источника мы можем получить пульсирующий ток, который не всегда пригоден для питания электрических цепей.

Измерительные приборы, используемые в данной лабораторной работе, предназначены для измерения исключительно постоянного или синусоидального переменного напряжения и силы тока. Для правильного измерения в цепях, где есть пульсирующее напряжение и ток, они не предназначены. Их неправильное использование может привести к неправильным результатам при определении КПД. Например, к получению значения КПД более 100%.

Для получения выпрямленного тока, практически свободного от пульсаций, применяют *сглаживающие фильтры*.

Одним из простейших используемых фильтров является индуктивный фильтр. В индуктивном фильтре катушку индуктивности (дроссель) включают последовательно с нагрузкой R_n (рис.6). Работа фильтра основана

на явлении самоиндукции, которое изначально препятствует нарастанию тока, а затем поддерживает его при уменьшении.

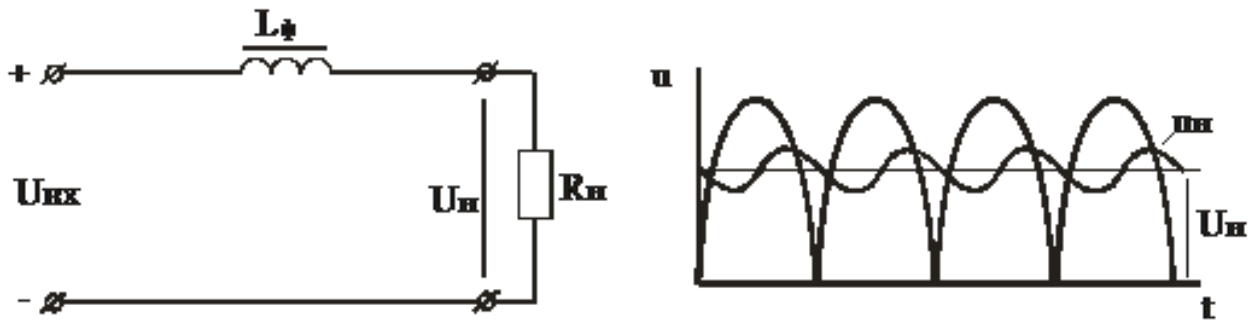


Рис.6. Схема индуктивного фильтра и временные диаграммы напряжений двухполупериодного выпрямителя с индуктивным фильтром.

Конструктивно дроссель выполняется в виде катушки с ферромагнитным сердечником, что позволяет получить высокое значение индуктивности (до нескольких Гн). Индуктивные фильтры обычно применяют при больших токах нагрузки. Сечение провода катушки зависит от тока нагрузки.

Также простейшим фильтром является *конденсатор* достаточно большой емкости, подключенный параллельно нагрузке.

Более сложные и эффективные фильтры состоят из сочетания конденсаторов и катушек.

В данной работе в качестве сглаживающего фильтра используется первичная обмотка мощного трансформатора, имеющая невысокое собственное активное сопротивление.

Коэффициент полезного действия (КПД) нагревателя

Нагреватель реализует преобразование электрической энергии в тепловую. Закон Джоуля – Ленца позволяет рассчитать КПД нагревателя.

В нашей работе нагреватель состоит из двух резисторов-нагревателей (с общим сопротивлением R) включаемых последовательно и калориметра (рис. 7). В свою очередь, калориметр состоит из термоса, корпуса, мешалки и крышки.

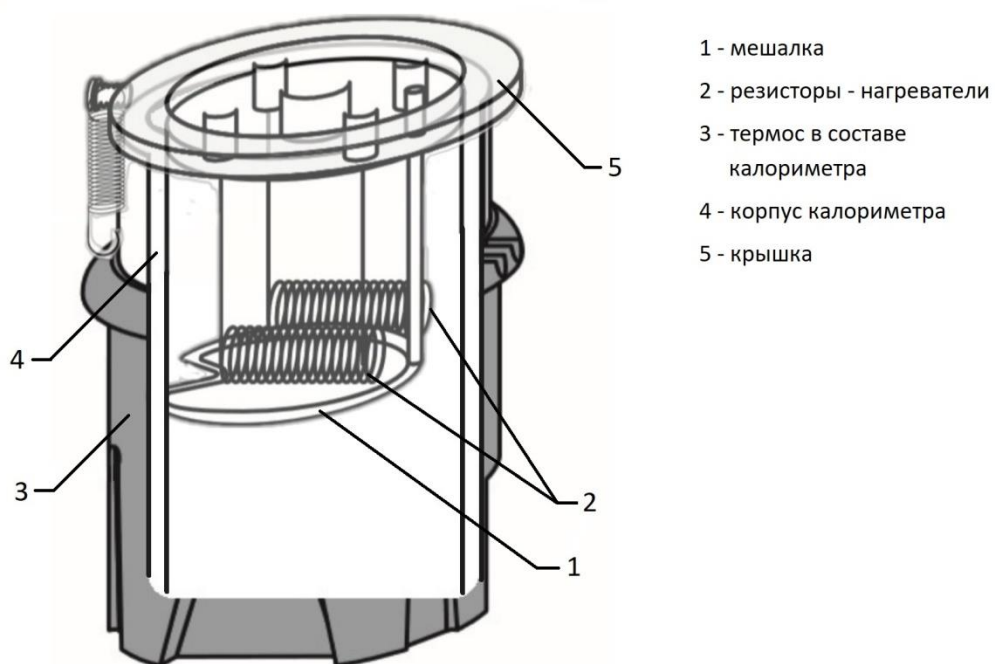


Рис.7. Нагреватель.

Коэффициент полезного действия (КПД) нагревателя равен отношению $\frac{Q_B}{Q_H}$, выраженному в процентах. Где Q_B - количество теплоты, полученное водой от резисторов-нагревателей, вычисляемое по формуле $Q_B = cm\Delta T$, а Q_H - количество теплоты, выделившееся в нагревателе, используя формулу $Q_H = IUt$.

Следовательно, КПД вычисляется по формуле:

$$\eta = \frac{Q_B}{Q_H} \cdot 100\% = \frac{cm\Delta T}{IUt} \cdot 100\%. \quad (17)$$

Принципиальная схема установки для измерения КПД нагревателя изображена на рисунке 8.

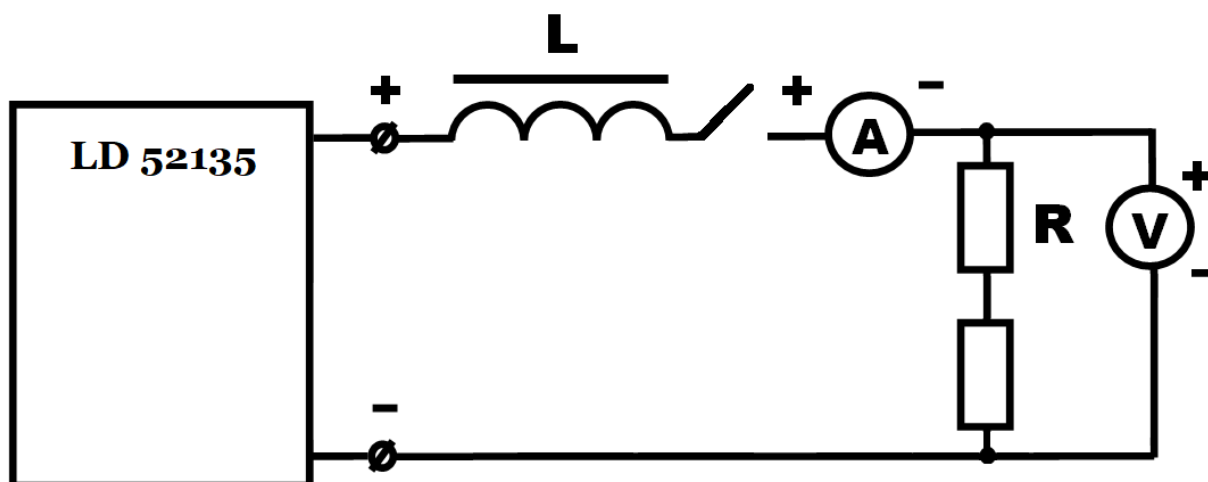


Рис.8. Схема установки.

Экспериментальная часть

Ход работы

1. Соберите электрическую цепь согласно принципиальной электрической схеме рис.8 (или убедитесь, что она собрана правильно).
2. Убедитесь, что ключ разомкнут, а регулятор напряжения источника тока находится в положении, обозначенном белой точкой.
3. Убедитесь, что датчик температуры (термопара) закреплена на штативе и извлечена из калориметра.
4. Откройте крышку калориметра, отсоединив две пружины от нижней части калориметра (термоса).
5. Залейте в калориметр 170 мл воды, находившейся достаточное время при комнатной температуре. Объем воды следует заранее отмерить с помощью измерительного сосуда.
6. Закройте крышку калориметра.
7. Разместите датчик температуры в калориметре, опустив его внутрь до указанного пластиковым диском на датчике уровня. Зафиксируйте датчик с помощью штатива.
8. Убедитесь, что у измерительных приборов – амперметра (LD Analog 30) и вольтметра (LD Analog 20) правильно выбраны пределы измерения (3 А «DC» и 10 В «DC» соответственно) и включите измерительные приборы.

9. Включите блок измерителя температуры (электронного термометра).

10. Зафиксируйте значение температуры, соответствующее температуре воды до включения нагревателя (например, путем занесения в протокол).

11. Установите секундомер в рабочее положение.

12. Включите источник питания.

13. Одновременно замкните ключ и включите секундомер.

ВНИМАНИЕ! При размыкании ключа, благодаря большой индуктивности катушки, в цепи (и в частности на ключе) выделяется значительная энергия. Прикосновение к проводящим элементам цепи в момент ее размыкания должно быть исключено во избежание электрического шока!

14. Определите величины силы тока через резисторы-нагреватели и напряжение на них. А также до размыкания цепи необходимо следить за неизменностью измеряемых значений. Зафиксируйте полученные значения. В случае существенного изменения этих значений (в течение 300 следующих секунд) данный факт следует также зафиксировать.

15. Через 300 секунд после замыкания цепи, цепь должна быть разомкнута ключом.

ВНИМАНИЕ! При размыкании ключа, благодаря большой индуктивности катушки, в цепи (и в частности на ключе) выделяется значительная энергия. Прикосновение к проводящим элементам цепи в момент ее размыкания должно быть исключено во избежание электрического шока!

16. Выключите источник питания.

17. Незамедлительно после этого произведите перемешивание воды в нагревателе с помощью мешалки; ее следует поднять до упора и опустить, повторив эти движения около 10 раз.

18. Определите установившееся значение температуры воды и зафиксируйте его.

19. Выключите электронный термометр.

20. По полученным в результате измерений данным определите КПД нагревателя.

Вопросы и задания

1. Опишите картину выделения теплоты при протекании тока в металле.
2. Получите формулы (10) и (11) дифференциальной формы закона Джоуля-Ленца.
3. Что такое действующее значение силы синусоидального тока? Как оно связано с амплитудой?
4. Объясните устройство калориметра.
5. Что такое теплоемкость? В чем отличие теплоемкости и удельной теплоемкости?
6. Насколько значительно зависит от температуры значение удельной теплоемкости жидкости (воды)?
7. Какой вклад в КПД дает термос? Какие его параметры потребуются для оценки этого вклада, с учетом того факта, что полезной работой является исключительно нагревание воды в нагревателе.

Литература

1. Калашников С.Г. Электричество: Учебное пособие. –М.: Наука. 1985.- 576с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2.- М.: Наука. 1978.-480 с.
3. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма: Учеб. Пособие для вузов. –М.: Высш. Шк., 1983.-279 с.

Мария Ридовна Каткова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ**

Практикум