



## СОДЕРЖАНИЕ

### Основная школа

В. В. Майер	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК ВНУТРИ	
И. Н. Данилов	ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА .....	3

### Старшая школа

А. Г. Некрасов	ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛА КАРНО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ <i>L-MICRO</i> .....	7
Е. И. Вараксина А. А. Попова	ДИДАКТИЧЕСКИЙ РЕСУРС УЧЕНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА «ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЛИПСА» .....	13

### Высшая школа

С. А. Герасимов	ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НЕЗАМКНУТЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ, ИЛИ КАК ИЗМЕРИТЬ СИЛУ САМОДЕЙСТВИЯ? .....	22
В. В. Майер	ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ: КОНСПЕКТ ЛЕКЦИИ ДЛЯ БАКАЛАВРИАТА .....	30

## Компьютер в эксперименте

С. В. Марков ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО  
ТОКА НА БАЗЕ ЦИФРОВОГО СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТЫ  
AD9833 ДЛЯ ДЕМОСТРАЦИОННЫХ ОПЫТОВ  
С АДРЕСНЫМИ СВЕТОДИОДНЫМИ ЛЕНТАМИ ..... 41

Е. И. Вараксина ЦИФРОВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ РЕСУРС  
О. Л. Соколова ПО ФИЗИКЕ В УЧЕБНОМ ПРОЕКТЕ ПО ИНФОРМАТИКЕ .. 52

АВТОРЫ ЖУРНАЛА ..... 67

ABSTRACTS ..... 68

---

---

### Редакция журнала:

В. В. Майер (главный редактор), Р. В. Акагов, Е. И. Вараксина, Л. С. Кропачева

### Редакционный совет:

В. Е. Антонов	д.ф.-м.н., с.н.с., ИФТТ РАН, МГУ, Москва
Л. Д. Григорьева	к.ф.-м.н., доцент, МГУ, Москва
С. С. Назин	к.ф.-м.н., доцент, МГУ, Москва
Г. Г. Никифоров	к.п.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
А. Ю. Пентин	к.ф.-м.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров
Э. В. Суворов	д.ф.-м.н., профессор, ИФТТ РАН, МГУ, Москва
Я. А. Чиговская-Назарова	к.филол.н., доцент, ректор ГППИ, Глазов

### Оргкомитет конференции:

М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
Ю. В. Иванов	к.п.н., доцент, Глазов
Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Ф. А. Сидоренко	д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Т. Н. Шамало	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов,  
Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГППИ». Телефон: (341 41) 5-32-29.

E-mail: [kropa@bk.ru](mailto:kropa@bk.ru)

---

---

**Учредитель:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный педагогический институт имени В. Г. Короленко».

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686, перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77-69506.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

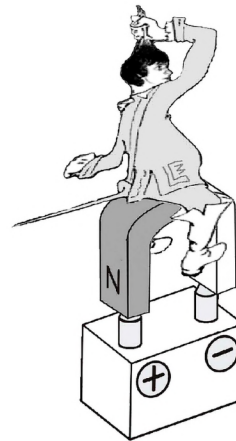
Сдано в набор 12.05.21. Подписано в печать 15.06.21. Дата выхода в свет: 28.06.21.  
Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,25.

Заказ 146. Тираж 200 экз. Цена свободная.

**Первая страница обложки:** Современный вариант знаменитого опыта Г. Герца по поляризации электромагнитных волн (Mayer V V and Varaksina E I 2021 Modern demonstration experiments for H Hertz's experimental study *Eur. J. Phys.* **42** 025201).

УДК 537.6

С. А. Герасимов  
 ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НЕЗАМКНУТЫМ  
 ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ,  
 ИЛИ КАК ИЗМЕРИТЬ  
 СИЛУ САМОДЕЙСТВИЯ?



Силу самодействия, с которой незамкнутая система действует сама на себя, можно обнаружить и измерить в обычных лабораторных условиях. Для системы, состоящей из тонкого намагниченного диска и незамкнутого проводника, полученное значение силы самодействия на несколько порядков больше известного значения.

*Ключевые слова:* магнитное поле, электрический ток, вес, намагниченность, незамкнутый проводник.

О самодействии в электродинамике, то есть о возможности того или иного тела действовать самого на себя, производя отличную от нуля силу, написано очень много, даже слишком много. Одни говорят, что оно должно быть, другие — оно есть, третьи категорически отвергают, ссылаясь не на закон сохранения импульса, а на его упрощенный вариант, известный как третий закон Ньютона. «Сила действия равна силе противодействия» — в известном смысле жаргонное представление об этом законе. Имеется в виду, судя по всему, утверждение, согласно которому сумма силы действия, с которой одно тело действует на другое, и силы реакции, с которой другое тело действует на первое, в замкнутой системе равна нулю. В таком изложении, но только в классической механике это полностью отвечает закону сохранения импульса. Классическая механика не знает других сил. Для нее сила — физическая величина, характеризующая воздействие на тело *других* тел, в результате которого тело приобретает ускорение.

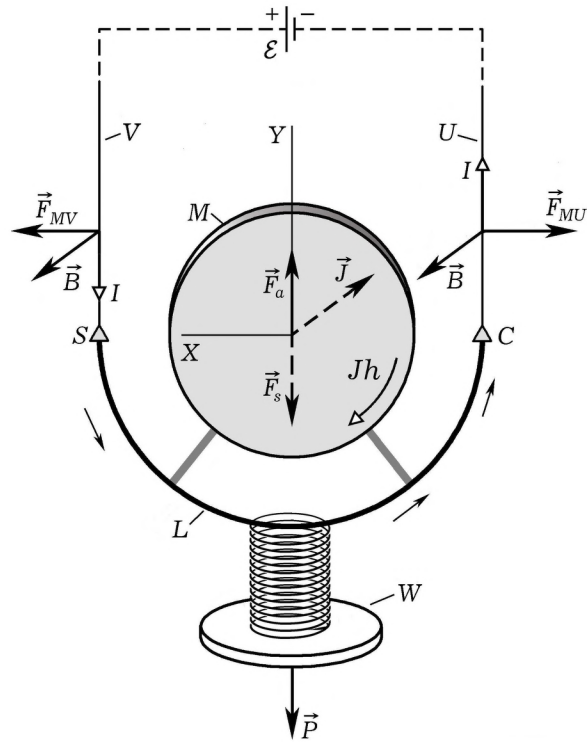
В электродинамике все сложнее и интереснее. Если магнетизм — следствие теории относительности с ее запаздыванием передачи воздействия одного тела на другое, то едва ли следует

безоговорочно подчиняться третьему закону Ньютона с его мгновенным во времени характером взаимодействия между телами.

Сначала Р.Сигалов с сотоварищами обратили внимание на особенности магнитного взаимодействия между проводниками с током [1], затем американцы итальянского происхождения без стеснения и оправдания, передрав схему Р.Сигалова, попытались измерить силу самодействия, которая должна действовать на незамкнутую часть электрической цепи [2]. Где нет сомнения, там нет и правды. Как результат там нет ни слова ни о законе сохранения импульса, ни о других силах, обнуляющих полную силу в замкнутой системе; зато все подано так, что любая попытка проверить этот «американский» результат технически и математически сопряжена с такими трудностями, на которые редко кто отважится. Кто-нибудь объяснит, как Кавальери с подельниками при помощи обычной подвесной системы удалось измерить силу порядка  $10^{-6}$  Н? Кто-нибудь объяснит, что происходит в жидкости, через которую течет ток в несколько десятков ампер? Как, спрашивается, итальянцам удалось прорваться на ускоритель [3], чтобы продвинуть результат, который они считают только своим?

Почему-то никто не обратил внимание на одно важное обстоятельство, относящееся к силе самодействия. Квадрат силы тока, которому она пропорциональна, можно рассматривать как произведение индукции магнитного поля, создаваемого проводником с током, на силу тока. Магнитное поле может создаваться другим телом, составляющим незамкнутую систему, например мощным магнитом, поверхностный молекулярный ток которого на несколько порядков больше тока, который в реальных условиях можно пропустить через проводник. Например, плотность молекулярного тока неодимового магнита достигает величины  $10^6$  А/м, а значит незамкнутая система, состоящая из магнита  $M$  и незамкнутого проводника  $L$ , должна испытывать действие очень большой силы самодействия (рис. 1). Не надо уподобляться тем, кто за «бугром», поэтому остаток всей замкнутой системы должен быть не только описан, но и внимательно рассмотрен. Это — два длинных проводника  $VS$  и  $CU$  вместе с очень далеко расположенным источником тока  $\mathcal{E}$ . Электрический ток из одной части замкнутой электрической цепи поступает в другую, минуя обычные электро-механические контакты  $S$  и  $C$ . Пружина  $T$  нужна лишь затем, чтобы обеспечить непрерывность прохождения тока.

Индукция внешнего магнитного поля, создаваемого тонким магнитом, перпендикулярна плоскости, в которой лежит магнит, и перпендикулярна проводникам  $VS$  и  $CU$ ; магнитные силы  $\vec{F}_{MV}$  и  $\vec{F}_{MU}$ , с которыми магнит действует на проводники, равны по вели-

Рис. 1.  $M + L$  — незамкнутая система

чине и противоположны по направлению:  $\vec{F}_{MV} + \vec{F}_{MU} = 0$ . В этом смысле на неподвижную часть системы, представляющую собой проводники  $VS$  и  $CU$  и удаленный источник тока, ничего не действует; значит, и на магнит  $M$ , сопряженный с витком  $L$ , ничего действовать не должно. Возникает противоречие: магнит должен выталкиваться в область максимальной неоднородности внешнего магнитного поля, значит, на него должна действовать некоторая сила  $\vec{F}_a$ , назовем ее силой действия. Чтобы на подвижную незамкнутую систему  $M + L$  ничего не действовало, сила действия  $\vec{F}_a$  должна компенсироваться чем-то, не вызванным действием неподвижной системы на магнит. Все верно. Молекулярный ток силы  $Jh$  ( $J$  — намагниченность,  $h$  — толщина диска) по ободу тонкого магнита течет по часовой стрелке, а в витке — в обратную сторону, значит, магнит должен притягиваться к витку с некоторой не равной нулю силой  $\vec{F}_s$ . Конечно, виток  $L$  тоже притягивается к магниту, и не факт, что эта сила обнуляет действие магнита на

виток. Эту силу, которая по существу описывает действие объединенного тела  $M + L$  самого на себя, можно даже вычислить. Поскольку эта сила представляет собой разность векторных потенциалов, создаваемых магнитом на концах витка, помноженную на силу тока [4], то вертикальная составляющая этой силы:

$$F_s = \frac{\mu_0 J h I}{4\pi} r \int_0^{2\pi} \left( \frac{1}{\sqrt{r^2 + p^2 + 2rp \cos \varphi}} - \frac{\cos \varphi}{\sqrt{r^2 + p^2 - 2rp \cos \varphi}} \right) \cos \varphi d\varphi, \quad (1)$$

где  $r$  — радиус магнита,  $p$  — радиус витка.

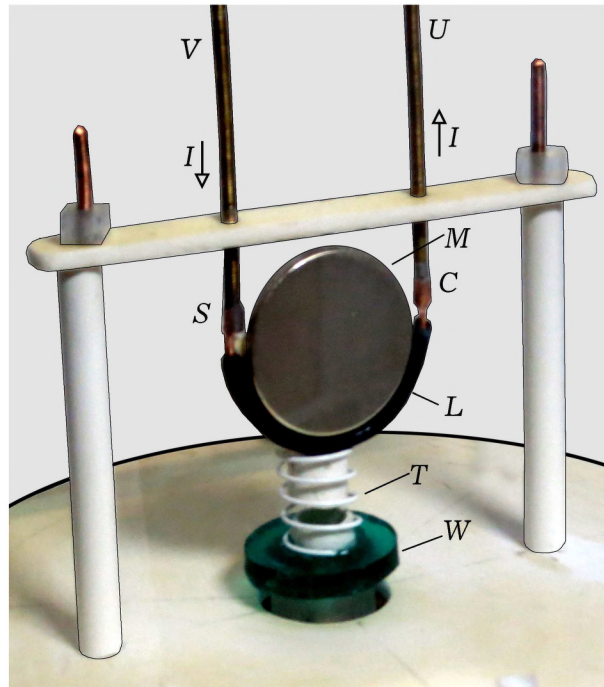


Рис. 2. «Нулевой эксперимент»

Первое, что обязательно следует сделать, — экспериментально проверить, действительно ли магнитная сила, действующая на подвижную систему, равна нулю. Если окажется, что это не так, придется пересматривать все, включая не только расчет, но и весь подход к проблеме.

Экспериментальная установка (рис. 2) мало чем отличается от постановки задачи (рис. 1); остается привести ее параметры: радиус магнита  $r = 15$  мм, его намагниченность  $0,73 \cdot 10^6$  А/м;

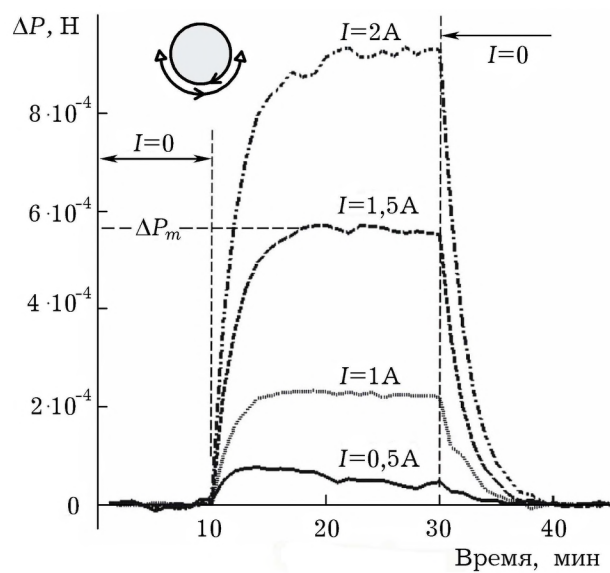
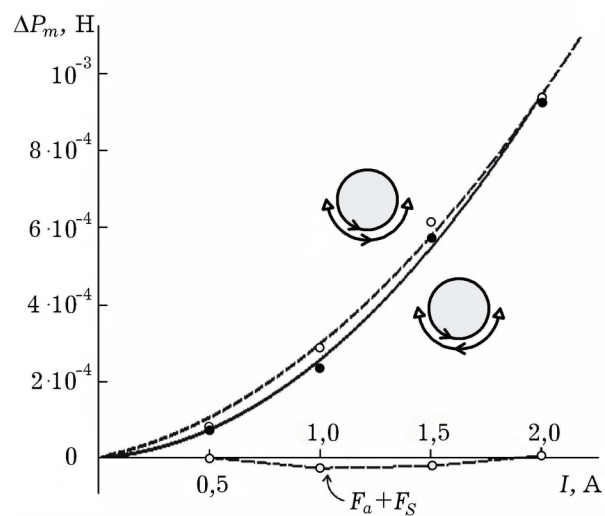
Рис. 3. Изменение веса со временем при антипараллельных токах  $I$  и  $J_h$ 

Рис. 4. Максимальное изменение веса при параллельных и антипараллельных токах

толщина  $h = 3$  мм, радиус витка  $p = 18$  мм. Тот же магнит, те же проводники, вот только весы, измеряющие вес  $P$ , лучше использовать цифровые: придется измерять изменение веса  $\Delta P$  со временем. Причина понятна: очень необычно ведут себя электро-механические контакты [5]. От них можно ждать все, что угодно: электрическое поле в контактах велико, а проводник, по которому течет ток, заряжен [6].

При включении тока вес системы возрастает и выходит на насыщение, сформировав его максимальное значение изменения веса  $\Delta P_m$  (рис. 3). Что-то подобное и очень похожее происходит и в том случае, если поменять направление тока во внешней цепи. При этом знак изменения веса остается прежним, и это хорошо, поскольку и сила действия, и сила самодействия при перемене направления либо тока, либо намагниченности знак меняют. Приводить мало чем отличающуюся зависимость изменения веса от времени при параллельных токах нет никакой необходимости. Лучше привести зависимости количественной характеристики изменения веса (рис. 4), то есть  $\Delta P_m$ , от силы тока: силы действия и самодействия в отличие от изменения веса от силы тока должны вести себя линейно.

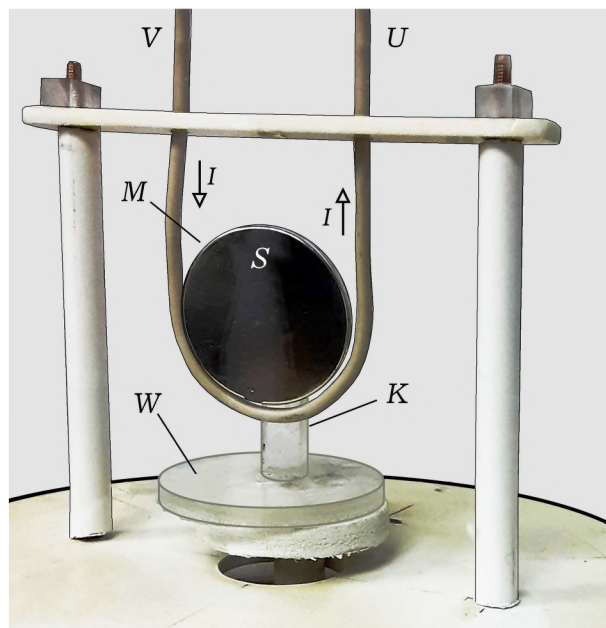


Рис. 5. Измерение силы действия



Разность этих зависимостей, поделенную на 2, выдать за сумму сил действия и самодействия невозможно (рис. 4). Ни одна из них, ни их разность при изменении силы тока в цепи не ведут себя линейно. Вывод прост до тривиальности: это ноль! Остается измерить силу противодействия; с точностью до знака это будет сила самодействия. Раз мы не можем ее, эту странную силу, измерить напрямую, раз мы доказали, что для схемы, изображенной на рис. 1, силы действия и самодействия равны по величине и противоположны по направлению, то немного изменив схему эксперимента, можно поставить точку в этой важной проблеме.

Теперь пружина не нужна, не нужны электромеханические контакты, нужен упор  $K$ , установленный на чашке весов  $W$ , к которому прикреплен магнит (рис. 5). Магнит  $M$ , разумеется, с проводником  $VU$  не соприкасается. Конечно же, оригинальностью такая схема не отличается; аналогичные измерения проводились неоднократно. Цель оправдывает средства, поскольку в рассказах о силах [7], с которыми взаимодействуют проводники, нет ничего серьезного о самодействии.

Привести зависимость силы самодействия, по существу равной минус силе действия, от силы тока в цепи было обязательно (рис. 6). Иначе можно было подумать, что она настолько мала, что едва ли был смысл ее рассматривать.

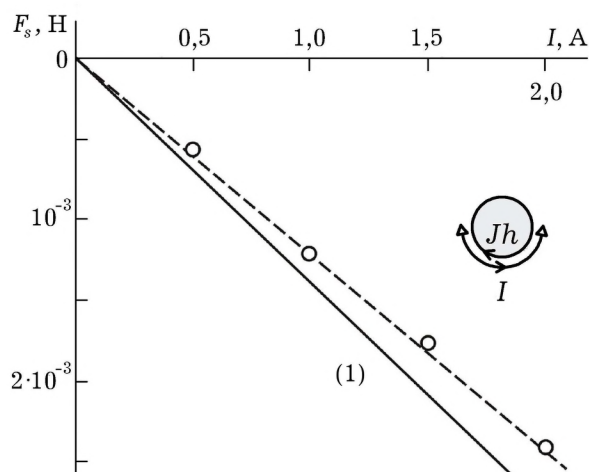


Рис. 6. Зависимость силы самодействия от силы тока в цепи

Совпадение с результатами расчета (1) более, чем удовлетворительное. Надо вспомнить: выражение (1) относится к бесконечно тонкому магниту и витку с нулевым сечением. При желании

можно провести и более сложный расчет. Однако пока и этого достаточно хотя бы затем, чтобы убрать знак вопроса из названия. Этот знак ставят тогда, когда не понятно, что с собой захватить и куда быстро двигаться.

*ЛИТЕРАТУРА*

1. Сигалов Р.Г., Шаповалова Т.И., Каримов Х.Х., Самсонов Н.И. Магнитные поля и их новые применения. — М.: Наука, 1976. — 104 с.
2. Cavallieri G., Bettoni G., Tonni E., Spavieri G. Standard Electrodynamics of Measuring the Self-Force on a Part of a Current Loop // *Physical Review E*. — 1998. — V. 58. — No 2. — P. 2505–2517.
3. Tonni E. About the Electrodynamical Force Controversy // *Hadronic Journal*. — 2000. — V. 23. — No 3. — P. 363–357.
4. Gerasimov S.A. Self-interaction and Vector Potential in Magnetostatics // *Physica Scripta*. — 1997. — V. 56. — No 5. — P. 462–464.
5. Герасимов С.А. Вес незамкнутого проводника с переменным электрическим током // *Инженерная физика*. — 2020. — № 12. — С. 16–19.
6. Малов Н.Н., Оглоблин Г.В. О силовых взаимодействиях проводов с током // *Известия вузов. Физика*. — 1977. — № 10. — С. 151–153.
7. Николаев Г.В. Непротиворечивая электродинамика. Теории, эксперименты, парадоксы. — Томск: Изд-во НТЛ, 1997. — 144 с.

Южный федеральный  
университет

Поступила в редакцию 31.03.21.

## ABSTRACTS

**Mayer V. V., Danilov I. N. Electric current inside a galvanic cell.** A simple demonstration experiment is described, showing that a current flows inside a loaded galvanic cell in the direction from the negative pole of the source to the positive one. A homemade magnetic needle made of neodymium magnets has been used as a current indicator. *Keywords:* current source, electromotive force, electric current in closed circuit.

**Nekrasov A. G. Study of the Carnot cycle using L–micro.** The method of conducting a lesson dedicated to studying the Carnot cycle is proposed. The lesson uses the L–micro digital laboratory. *Keywords:* lesson, educational research, Carnot cycle, L–micro laboratory.

**Varaksina E. I., Popova A. A. Didactic resource of students' project «Optical properties of ellipse».** The necessity of organizing project activity of an interdisciplinary nature when studying mathematics is justified. Simple tasks of one of the possible projects devoted to the experimental study of the optical properties of ellipse are proposed. *Keywords:* mathematics, physics, educational project, didactic resource, ellipse.

**Gerashimov S. A. Experiments with unclosed electric current, or how to measure the self–force?** The self-force by means of which an unclosed system acts on itself can be found and measured in a usual laboratory. For a system consisting of thin magnetized disk and unclosed conductor, the obtained value of the self-force is several orders of magnitude greater than known value. *Keywords:* magnetic field, electric current, weight, magnetization, unclosed conductor.

**Mayer V. V. Elements of the theory of optical devices: lecture notes for undergraduate students.** The content of the lecture on the discipline «General and experimental physics. Optics» is presented in a summary form. The lecture is developed for bachelor course of pedagogical university. *Keywords:* optical devices, visual observations, magnifying glass, microscope, telescope, diffraction nature of the image, resolution.

**Markov S. V. Infra–low–frequency alternator based on the AD9833 digital frequency synthesizer for demonstration experiments with addressable LED strips.** The paper presents an affordable design of an infra–low–frequency alternator based on the AD9833 digital frequency synthesizer. The generator is designed for the educational study of electrical vibrations in elements included in the AC circuit, the phenomenon of electro–magnetic induction and self-induction together with address ring LED strips. *Keywords:* AD9833 digital frequency synthesizer, infra–low–frequency alternator, electrical oscillations in AC circuits, electromagnetic induction, self–induction, microcontroller board ArduinoUNO, address LED strip.

**Varaksina E. I., Sokolova O. L. Physics digital educational resource in a computer science educational project.** The content of interdisciplinary students' project in computer science is proposed. The result of the productive activity of teachers and students is a digital educational resource designed for physics lessons on the introduction and formation of the concept of harmonic wave. *Keywords:* computer science, physics, educational project, digital educational resource, harmonic wave, Lazarus.