

ISSN 2307-5457	НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ
<i>Primum inter pares</i>	 УЧЕБНАЯ ФИЗИКА
Материалы XXVII Всероссийской научно-практической конференции	Октябрь - декабрь 2022 №4
«Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения»	Издается с января 1997 года

СОДЕРЖАНИЕ

От редакции

К ЮБИЛЕЮ ПРОФЕССОРА
ЮРИЯ АРКАДЬЕВИЧА САУРОВА 3

Ю. А. Сауров ОБ ИСТОРИЧЕСКОЙ МИССИИ ЖУРНАЛА
«УЧЕБНАЯ ФИЗИКА» ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ
ПРАКТИКИ ОБУЧЕНИЯ 6

Основная школа

В. В. Майер ШКОЛЬНЫЕ ДЕМОСТРАЦИОННЫЕ
Е. И. Вараксина ОПЫТЫ ПРИ ИЗУЧЕНИИ
Б. А. Хайдаров ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ 9

В. В. Майер ПРИБОРЫ ДЛЯ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО
Е. И. Вараксина ФОТОГРАФИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
И. А. Васильев ДВИЖЕНИЙ 13
Б. А. Хайдаров

Старшая школа

В. А. Саранин КАПЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АТОМНОГО ЯДРА 23

Высшая школа

В. В. Майер ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА
Е. И. Вараксина В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ:
УЧЕБНАЯ ТЕОРИЯ 31

В. В. Майер ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА
Е. И. Вараксина В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ:
УЧЕБНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ 42

Компьютер в эксперименте

В. В. Шамшутдинова	ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	
С. В. Обухов	ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ДИФРАКЦИИ	
Ю. Б. Моржикова	ФРАУНГОФЕРА	50

Исследования

В. В. Майер	ЭКСПЕРТИЗА НОВЫХ УЧЕБНЫХ	
Е. И. Вараксина	ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	54

АВТОРЫ ЖУРНАЛА	67
ABSTRACTS	68
СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛЕ В 2022 ГОДУ	70

Редакция журнала:

В. В. Майер (главный редактор), Р. В. Акатов, 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 ГГПИ, Глазов

Оргкомитет конференции:

М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
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, Пединститут, Телефон: (341 41) 5–32–29.

E-mail: 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 01.11.22. Подписано в печать 20.12.22. Дата выхода в свет: 23.12.22. Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,5.

Заказ 154. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Простая лекционная демонстрация токов проводимости и смещения. Для визуализации токов в цепи с конденсатором использованы три одинаковые неоновые лампы.

УДК 372.853:537.8

В. В. Майер, Е. И. Варакина
**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА
В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ:
УЧЕБНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ**

Описаны простые количественные эксперименты по распространению электромагнитных волн дециметрового диапазона в двухпроводной линии. В опытах использованы микромощный генератор и чувствительный индикатор электромагнитного излучения частотой 433 МГц.

Ключевые слова: двухпроводная линия, электромагнитная волна, длина волны, скорость распространения.

Предлагаемая вниманию читателей статья является экспериментальным продолжением опубликованной в этом номере журнала работы [1], в которой изложены элементы учебной теории двухпроводной линии.

**1. Основное оборудование для опытов
с двухпроводной линией**

1. Микромощный генератор и чувствительный индикатор электромагнитного излучения дециметрового диапазона, необходимые для учебных опытов с двухпроводной линией, описаны в работах [2, 3]. Напомним, что эти простые и безопасные приборы позволяют выполнить большую серию демонстрационных и лабораторных экспериментов, доказывающих существование и волновую природу электромагнитного излучения.

2. Двухпроводная линия с воздушным диэлектриком состоит из двух дюралевых трубок диаметром 5 мм и длиной 1100 мм, закрепленных на расстоянии 30 мм параллельно друг другу посредством распорок из оргстекла или другого диэлектрика. Такую линию нетрудно сделать, ее масса мала, линию удобно использовать и хранить, например, на стенке шкафа в вузовской лаборатории.

3. Двухпроводную линию с твердым диэлектриком изготавливают следующим образом. Отрезают примерно метр двухжильного (звонкового) провода в прозрачной или светлой изоляции. Диаметр жил такого провода 1 мм, расстояние между жилами

3 мм. Отрезок двухжильного провода скотчем или изолянтной закрепляют на демонстрационном метре из изолятора. Так получают двухпроводную линию, промежуток между проводами которой заполнен диэлектриком. Цвет изоляции имеет значение, так как сопротивление черной изоляции меньше, чем белой.

2. Опыты с двухпроводной линией

Для понимания и объяснения результатов описанных здесь опытов имеет смысл обратиться к материалам, представленным в работе [1].

Опыт 1. Стоячая волна в линии с воздушным диэлектриком и разомкнутым концом. Двухпроводную линию размещают на лабораторном столе. С началом линии простым касанием соединяют выход микромощного генератора без антенны. Включают питание генератора и индикатора. Располагают индикатор так, чтобы его приемный диод оказался непосредственно возле линии перпендикулярно ее проводам.

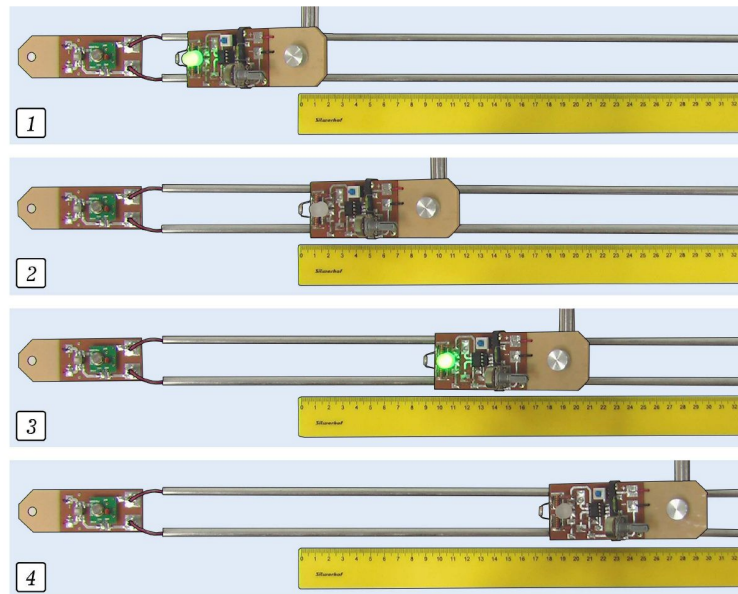


Рис. 1. Индикатор электромагнитного излучения перемещают вдоль двухпроводной линии с воздушным диэлектриком. Светодиод индикатора загорается в пучностях (фотографии 1 и 3) и гаснет в узлах (фотографии 2 и 4) стоячей волны. Непосредственно по фотографии можно определить длину электромагнитной волны

Медленно перемещают индикатор вдоль линии и обнаруживают, что светодиод индикатора периодически загорается и гаснет (рис. 1). Это означает, что в линии установилась стоячая электромагнитная волна. Индикатор позволяет найти узлы и пучности стоячей волны.

Измерив расстояние между соседними узлами или пучностями, получают значение, близкое 0,34 м. Длина бегущей электромагнитной волны, распространяющейся вдоль линии, в два раза больше этого значения: $\lambda = 0,68$ м. Так как частота генератора стабилизирована установленным в нем ПАВ-резонатором, то она равна $\nu = 433 \cdot 10^6$ Гц. Таким образом, скорость электромагнитной волны в линии с воздушным диэлектриком равна:

$$v = \lambda\nu = 0,68 \cdot 433 \cdot 10^6 = 2,94 \cdot 10^8 \text{ м/с.} \quad (1)$$

Точно такую же величину и тем же методом получают в опытах со стоячей волной в свободном пространстве.

Теория двухпроводной линии для скорости бегущей по ней электромагнитной волны дает значение [1]:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}} = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с,} \quad (2)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — электрическая и магнитная постоянные.

Опыт 2. Стоячая волна в короткозамкнутой линии с воздушным диэлектриком. Повторяют предыдущий опыт и небольшими предметами обозначают вблизи линии положения пучностей и узлов напряженности электрического поля стоячей электромагнитной волны. Устанавливают индикатор в какой-нибудь из обозначенных пучностей так, чтобы светодиод горел. Замыкают двухпроводную линию металлической перемычкой в узле стоячей волны, при этом светодиод продолжит светиться. Перемычку передвигают в пучность стоячей волны, и светодиод сразу гаснет.

Опыт показывает, что в узле напряженности электрического поля стоячей волны разность потенциалов между проводами двухпроводной линии равна нулю. Поэтому соединение проводов линии в этой точке не приводит к изменению режима работы линии. Если же линию замкнуть накоротко в пучности электрического поля, то стоячая волна сместится вдоль линии на четверть длины электромагнитной волны. В этом случае узлы и пучности стоячей волны меняются местами.

Опыт 3. Электромагнитная волна в бесконечно длинной линии. Измерив диаметр $2r$ проводов линии и расстояние d между их

осями, вычисляют волновое сопротивление Z линии по формуле, выведенной в статье [1]:

$$Z = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \ln \frac{d}{r} = \frac{1}{3,14} \sqrt{\frac{12,56 \cdot 10^{-7}}{8,85 \cdot 10^{-12}}} \cdot \ln \frac{30}{2,5} = 298 \text{ Ом.} \quad (3)$$

Подбирают постоянный резистор с сопротивлением R , близким к волновому Z . Этот резистор подключают к концу двухпроводной линии, просто отогнув под прямым углом его выводы и вставив их в отверстия трубок, из которых сделана линия. Затем включают генератор и индикатором проводят вдоль линии. Наблюдая, что во всех точках линии светодиод горит одинаково ярко, но слабее, чем он горел в пучностях стоячей волны. Отсюда следует, что по двухпроводной линии, нагруженной на резистор, сопротивление которого равно волновому, распространяется бегущая электромагнитная волна. Таким образом, исследованная линия эквивалентна бесконечно длинной.

Опыт 4. Стоячая волна в линии с твердым диэлектриком. К одному из концов линии, изготовленной из двухжильного провода в изоляции, подключают микромощный генератор ультра-высокой частоты. Прделав три описанных выше опыта с этой линией, обнаруживают, что в принципе она ничем не отличается от исследованной ранее линии с воздушным диэлектриком. Но расстояния между соседними пучностями и узлами напряженности электрического поля здесь явно меньше, чем в опытах с двухпроводной линией, находящейся в воздухе (рис. 2). Поэтому в такой линии длина электромагнитной волны и скорость ее распространения меньше, чем в свободном пространстве.

Скорость распространения электромагнитной волны в среде с диэлектрической ε и магнитной μ проницаемостями равна [1]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}. \quad (4)$$

Так как магнитная проницаемость диэлектрика $\mu = 1$, то рассмотренный опыт позволяет оценить диэлектрическую проницаемость диэлектрика на частоте использованного электромагнитного излучения:

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2, \quad (5)$$

где λ_0 и λ — длины электромагнитных волн одинаковой частоты ν в вакууме и в диэлектрической среде.

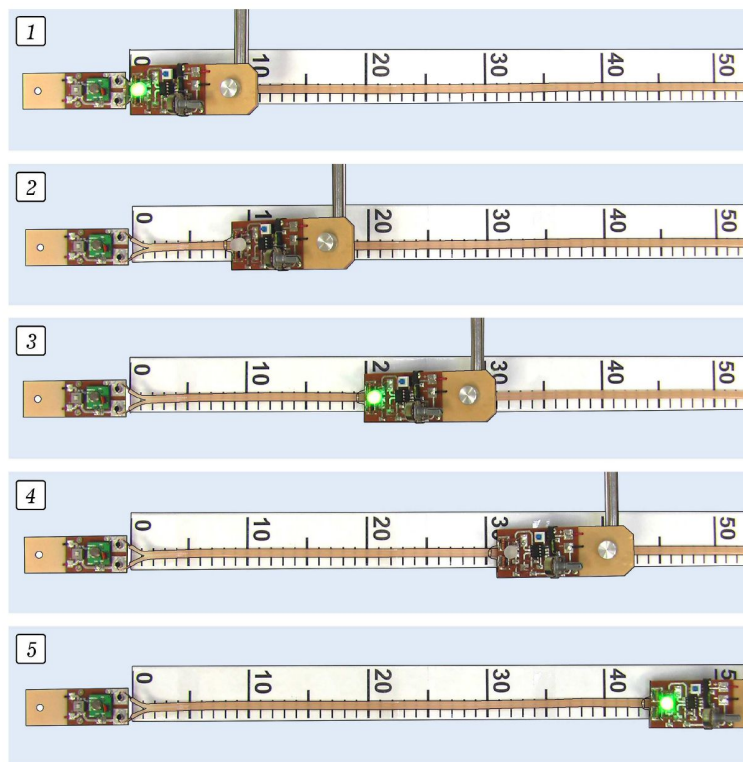


Рис. 2. Стоячая электромагнитная волна в двухпроводной линии с твердым диэлектриком. Длина волны электромагнитного излучения на этой фотографии меньше, чем на предыдущей. На фотографиях 1, 3 и 5 индикатор находится в пучностях стоячей волны, а на фотографиях 2 и 4 — в узлах

3. Визуализация стоячей электромагнитной волны

Много лет назад из люминесцентных ламп *дневного света* в нашей лаборатории был сделан экран, визуализирующий электрическое поле электромагнитной волны. Он представляет собой 36 ламп диаметром 37 мм и длиной 600 мм, которые установлены в ряд в специальной раме. Выводы ламп соединены последовательно и подключены к маломощному высоковольтному источнику импульсов, возбуждающему слабый тлеющий разряд в ртутных парах, заполняющих баллоны ламп. Электрическое поле распространяющейся рядом с этим экраном из ламп электромагнитной волны резко усиливает электрический разряд в парах

ртути. Люминофор, покрывающий изнутри баллоны ламп, под действием ультрафиолетового излучения разряда возбуждается. При этом ярко светятся те области экрана, в которых напряженность электрического поля волны превышает порог возбуждения люминофора ламп.

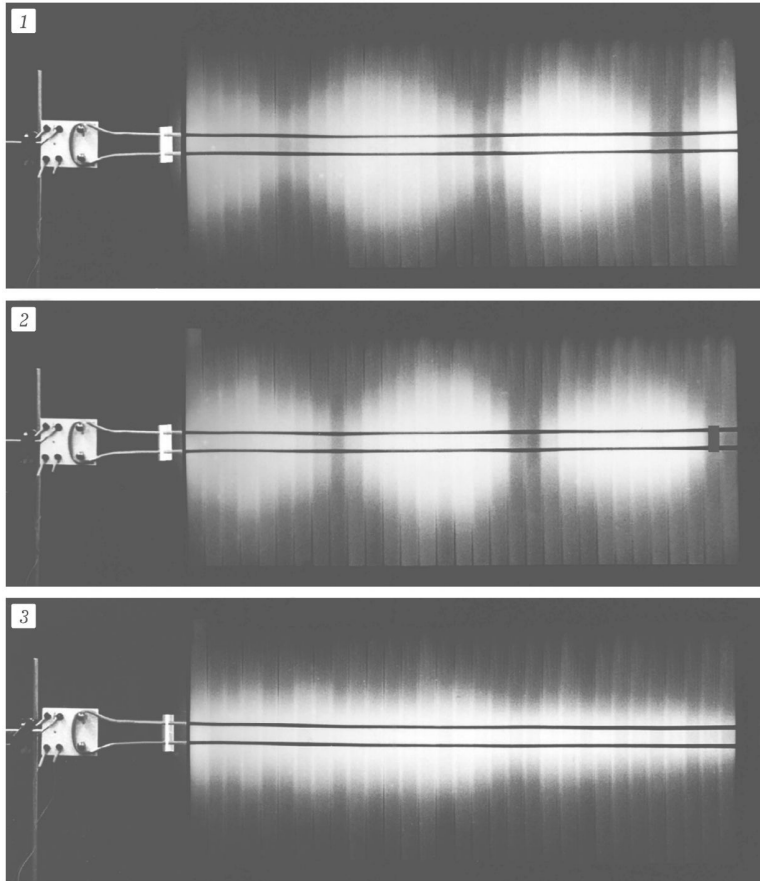


Рис. 3. Визуализация распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны в двухпроводной линии: 1 — линия с разомкнутым концом, индуктивно связанная с генератором, который расположен слева; 2 — линия с короткозамкнутым концом; 3 — линия, согласованная с активной нагрузкой

Фотографии основных типов волн в двухпроводной линии представлены на рис. 3. Слева на них вы видите закрепленный на

штативе ламповый генератор частотой примерно 433 МГц [4]. Главное достоинство этого прибора в том, что помимо двух электронных ламп типа 6Н15П он содержит только одну фабричную деталь — двухваттный резистор сопротивлением 400–500 Ом. Недостатки генератора по современным представлениям велики: 1) он опасен, так как для его питания нужны постоянное напряжение 250 В и переменное 6,3 В; 2) его мощность слишком велика; 3) частота нестабильна и поэтому значительны помехи. Сама двухпроводная линия изготовлена из медной трубки диаметром $2r = 8$ мм, расстояние между ее проводами $d = 40$ мм. На левом конце линии сделан полувиток, который индуктивно связан с колебательным контуром генератора.

На разомкнутом конце двухпроводной линии образуется пучность напряженности электрического поля электромагнитной волны. Фотография, приведенная на рис. 3.1, подтверждает сказанное. Посмотрим на конец двухпроводной линии, расположенный справа — он немного выходит за пределы экрана, поэтому мы не видим максимума правой пучности, но вполне понятно, что он есть. Теперь посмотрим на начало двухпроводной линии — рядом с ним находится узел стоячей волны напряжений, то есть расположена пучность электрического тока. Наконец сравним узлы напряженности электрического поля стоячей волны: они наиболее выражены возле правого конца линии и менее отчетливы вблизи левого. Это явление объясняется тем, что возле генератора интерферируют бегущие волны существенно разных амплитуд, поэтому в узлах стоячей волны интенсивность не равна нулю.

Повторим наблюдения электрического поля в стоячей волне, возникающей в короткозамкнутой линии (рис. 3.2). Здесь очевидно, что узел напряженности электрического поля стоячей волны образуется на перемычке, замыкающей линию. Ближайший к нему узел наиболее темный. Следующий узел находится возле генератора так, что на начале линии сила тока имеет определенное значение. Этот опыт убедительно показывает, что конец двухпроводной линии определяет режим работы ее начала.

Сделать бесконечно длинную линию невозможно. Но можно устранить отражение на конце линии так, что по ней будет идти бегущая волна (рис. 3.3). Для этого к концу линии надо подключить активную нагрузку, полностью поглощающую энергию бегущей волны. Теория показывает [1], что сопротивление этой нагрузки R должно быть равно волновому сопротивлению линии: $R = Z = \sqrt{L_0/C_0} = 276$ Ом (3). Мы соединили конец линии с постоянным резистором сопротивлением 280 Ом и получили бе-

гущую волну (рис. 3.3). На этой фотографии видно, что в опытах использовалась линия с потерями, так как интенсивность волны по мере распространения в линии уменьшается.

4. Заключение

Учебный эксперимент с электромагнитным излучением в двухпроводной линии может быть использован в физических практикумах педвузов, а также школ и классов с углубленным изучением физики. Лабораторная установка отличается простой, надежностью и компактностью, так как длина линии может составлять не более 70 см. Элементарная теория двухпроводной линии проста и доступна даже тем школьникам, которые обучаются на базовом уровне. В лабораторной работе они могут измерить длину волны и, воспользовавшись известным по маркировке ПАВ-стабилизатора значением частоты, вычислить скорость распространения электромагнитного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майер В. В., Вараксина Е. И. Электромагнитная волна в двухпроводной линии: учебная теория // Учебная физика. — 2022. — № 4. — С. 31–41.
2. Майер В. В., Вараксина Е. И., Васильев И. А., Кошечев Г. В. Комплект приборов для демонстрационных опытов с электромагнитными волнами // Физика в школе. — 2019. — № 4. — С. 41–46.
3. Майер В. В., Вараксина Е. И., Васильев И. А. Генератор и индикатор для учебных опытов с электромагнитным излучением // Учебная физика. — 2022. — № 3. — С. 34–40.
4. Семенцов Н. В. Двухтактный генератор дециметровых волн // Сб. «Сборник по методике и технике физического эксперимента». — М.: Учпедгиз, 1960. — 208 с.

Глазовский государственный
педагогический институт

Поступила в редакцию 13.04.22.

ABSTRACTS

To the jubilee of Professor Yuri Arkadyevich Saurov. The editorial board of the journal «Educational Physics» congratulates Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, corresponding member of the Russian Academy of Education Yuri Arkadyevich Saurov on his jubilee. *Keywords:* Yu. A. Saurov, physics education, methodology, experimental tasks.

Saurov Yu. A. About the historical mission of the journal «Educational Physics» to improve the practice of teaching. The prerequisites for the emergence and history of the development of the scientific and practical journal «Educational Physics» are considered. The importance of the journal for Russian physics education is shown. *Keywords:* physics education, Russian Academy of Education, scientific and practical journal.

Mayer V. V., Varaksina E. I., Khaidarov B. A. School demonstration experiments in the study of rectilinear motion. The set of «Mechanics» available in secondary schools and pedagogical universities is considered. The didactic potential of this set is analyzed in the experimental study of rectilinear motion in order to introduce the basic concepts of kinematics. *Keywords:* set «Mechanics», didactic potential, experimental study, rectilinear motion, kinematics concepts.

Mayer V. V., Varaksina E. I. Vasiliev I. A. Khaidarov B. A. Devices for stroboscopic photographing of mechanical movements. A pulse generator on a NE555 timer with two fixed flash frequencies of an ultra-bright LED is proposed as a stroboscopic light source. The device is designed for independent experiments of students in the study of mechanics. *Keywords:* stroboscopic light source, two fixed flash frequencies, independent students experiments.

Saranin V. A. Drop model of an atomic nucleus. On the basis of a principle of a minimum of energy stability of the charged spending drop in relation to its division half-and-half is investigated. The criterion of occurrence of instability which depends on a charge of a drop, its superficial tension and radius is found. From the same positions the drop model of an atomic nucleus and division of heavy kernels into two kernels-splinters is considered. *Keywords:* stability of the charged drop, an atomic nucleus, division of nucleus.

Mayer V. V., Varaksina E. I. Electromagnetic wave in two-wire line: an educational theory. The elementary theory of electromagnetic waves in two-wire line without resistance and radiation losses is briefly described. *Keywords:* two-wire line, linear capacitance and inductance, tele-

graphic equations, wave equation, electromagnetic wave, propagation velocity, wave resistance.

Mayer V. V., Varaksina E. I. Electromagnetic wave in two-wire line: a training experiment. Simple quantitative experiments on the propagation of electromagnetic waves in the decimeter range in two-wire line are described. In the experiments, a micro-powerful generator and a sensitive indicator of electromagnetic radiation with a frequency of 433 MHz are used. *Keywords:* two-wire line, electromagnetic wave, wavelength, propagation velocity.

Shamshutdinova V. V., Morzhikova Yu. B., Obukhov S. V. Virtual laboratory work on the study of Fraunhofer diffraction. We have proposed a complex of virtual laboratory works about the Fraunhofer diffraction on a single slit and a thin wire, on diffraction grating with enhanced functionalities. *Keywords:* laboratory practice, virtual work, physics, Fraunhofer diffraction, diffraction grating.

Mayer V. V., Varaksina E. I. Expertise of new educational physical experiments. The technology of carrying out an expert assessment of the possibility and expediency of using new educational physical experiments in school practice has been developed. *Keywords:* physical experiments, new educational experiments, expert evaluation, possibility and expediency, application in school.