

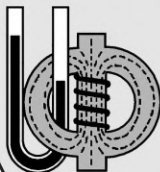
ISSN 2307-5457

*Primum
inter pares*

Материалы XXIX Всероссийской
научно-практической конференции

„Учебный физический эксперимент:
Актуальные проблемы. Современные
решения“

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ



**УЧЕБНАЯ
ФИЗИКА**

Апрель - июнь 2024 №2

Издается с января 1997 года

СОДЕРЖАНИЕ

Основная школа

В. В. Майер	ЦИФРОВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ РЕСУРС:
Е. И. Вараксина	ФОРМИРОВАНИЕ НАГЛЯДНОГО ОБРАЗА
	ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА.....3

Старшая школа

В. В. Майер	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
Е. И. Вараксина	ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ.....16

Высшая школа

С. А. Герасимов	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТИ,
Т. М. Седов	МАГНИТ С ПАРУСОМ И ВРАЩАТЕЛЬНЫЙ
	МОМЕНТ САМОДЕЙСТВИЯ.....32

И. В. Гребенев	ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
П. В. Казарин	ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ СТОЯЧИХ
Е. В. Чупрунов	ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.....40

С. В. Барышников	ЗНАКОМСТВО СТУДЕНТОВ С ИДЕЯМИ
	НАНОТЕХНОЛОГИЙ НА ЗАНЯТИЯХ ПО ФИЗИКЕ.....52

Исследования

А. С. Куимов	ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ
П. В. Зув	ГРАМОТНОСТИ УЧАЩИХСЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
	ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....58

Науковедение

Ю. А. Сауров	КОНСТАНТИН КОХАНОВ: ДВИЖЕНИЕ ВПЕРЕД.....66
--------------	--

АВТОРЫ ЖУРНАЛА.....72

Редакция журнала:

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

Редакционный совет:

И. В. Гребенев	д.п.н., профессор, Нижний Новгород
М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
О. В. Лебедева	д.п.н., доцент, Нижний Новгород
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров
А. П. Усольцев	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Оргкомитет конференции:

Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Г. Г. Никифоров	к.п.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
А. Ю. Пентин	к.ф.-м.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
Ф. А. Сидоренко	д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Я. А. Чиговская–Назарова	к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, Глазов
Т. Н. Шамало	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Перечень ВАК: Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.
E-mail: kropach@mail.ru, uch-fiz@mail.ru

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет 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.

Подписной индекс: 79876.

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

Сдано в набор 03.06.24. Подписано в печать 17.06.24.

Дата выхода в свет: 24.06.24.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,5.

Заказ 164. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Отремонтированная электрофорная машина (Майер В. В., Вараксина Е. И., Васильев И. А., Корнев Ю. А. Ремонт школьной электрофорной машины как средство развития инженерной компетенции // Учебная физика. — 2023. — № 2. — С. 14–37).

Научная статья

ББК 74.262.23

УДК 372.853

И. В. Гребенев, П. В. Казарин, Е. В. Чупрунов
ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ СТОЯЧИХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Предложен вариант изучения свойств электромагнитных волн в ходе лекционной демонстрации с использованием катушки Зейбта.

Ключевые слова: общая физика, стоячие электромагнитные волны, демонстрационный эксперимент, катушка Зейбта.

I. V. Grebenev, P. V. Kazarin, E. V. Chuprunov
DEMONSTRATION EXPERIMENT
TO STUDY THE PROPERTIES OF STANDING
ELECTROMAGNETIC WAVES

A variant of studying the properties of electromagnetic waves in the course of a lecture demonstration using a Seibt coil is proposed.

Keywords: general physics, standing electromagnetic waves, demonstration experiment, Seibt coil.

Постановка задачи

Стоячие волны являются частным случаем явления интерференции волн. Это интересный и практически важный раздел учения о волнах, достаточно сложный для изложения, но слабо подержанный в курсе общей физики продуктивными лекционными демонстрациями. Поэтому цель нашей работы состоит в создании развернутой лекционной демонстрации для изучения свойств стоячей электромагнитной волны, служащей основой продуктивной познавательной деятельности студентов. Хорошо известны результаты исследований, утверждающие, что без предварительных

диалогов, предсказаний результатов и обсуждения увиденного в контексте изучаемой теории сами по себе лекционные демонстрации не приводят к повышению уровня усвоения физического содержания обучаемыми [1].

Физическая основа

Стоячая волна образуется в результате наложения двух бегущих гармонических волн, распространяющихся навстречу друг другу. Рассмотрим этот вопрос по И. Е. Иродову:

«Пусть волна распространяется в положительном направлении оси X и описывается уравнениями

$$E_y(x, t) = E_m \cos(\omega t - kx), \quad H_z(x, t) = H_m \cos(\omega t - kx).$$

Уравнения волны, распространяющейся в обратном направлении, можно получить из предыдущих, если заменить в скобках минусы на плюсы и учесть, что векторы \vec{E} , \vec{H} , \vec{k} должны составлять правую тройку. Последнее означает, что перед E_m или H_m должен появиться знак минус.

Итак, пусть уравнения встречной волны будут иметь вид:

$$E_y(x, t) = E_m \cos(\omega t + kx), \quad H_z(x, t) = -H_m \cos(\omega t + kx).$$

В результате суперпозиции этих двух встречных волн получим

$$E_y = 2E_m \cos kx \cos \omega t, \quad H_z = 2H_m \sin kx \sin \omega t.$$

Это и есть уравнения *стоячей электромагнитной волны* в исследуемом нами случае. Они состоят из двух стоячих волн — электрической и магнитной. Видно, что в этой волне колебания векторов E и H сдвинуты по фазе на $\pi/2$ как в пространстве, так и во времени» [2, с. 48–49].

Обсудим несколько моментов, которыми необходимо дополнить изложенное выше. Отметим, во-первых, что автор не приводит аргументации, но, тем не менее, инвертирует именно вектор \vec{H} , что позволяет получить характерную картинку с узлом этого вектора поля в начале координат (рис. 1). Возникает вопрос, почему инвертируется \vec{H} ? Каковы физические основания выбора? А когда инвертируется вектор \vec{E} ?

Во-вторых, не указана причина появления идентичной встречной волны: чаще всего стоячую волну можно получить при наложении падающей и отраженной волн, если угол падения равен нулю, а коэффициент отражения близок к единице.

В-третьих, автор не обсуждает граничные условия, необходимые для существования устойчивой интерференционной картины.

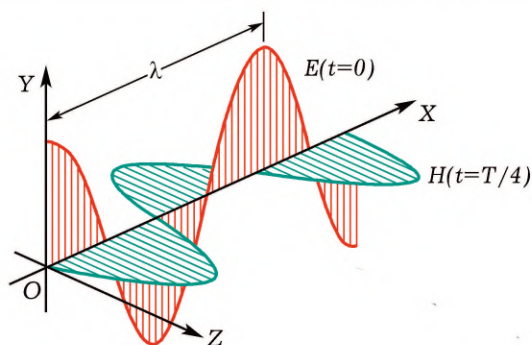


Рис. 1. Стоячая электромагнитная волна по И. Е. Иродову [2, с. 50]

Таким образом, у студентов складывается ошибочное мнение, что в любой ситуации встречные одинаковые волны дадут в итоге устойчивую стоячую волну как результат интерференции. Хотя несколькими страницами ранее, при рассмотрении волн в струне, стержне, было ясно показано, что в ограниченном одномерном случае появляются весьма жесткие ограничения на частоту волн, образующих устойчивые интерференционные состояния [2, с. 28]. Заметим, что эти представления будут активно использоваться далее в курсе квантовой механики, где граничные условия определяют правила квантования.

Практика преподавания

Электромагнитную стоячую волну в курсе физики демонстрируют при отражении бегущей волны, созданной 3 см генератором, от проводящей поверхности, которая перпендикулярна направлению распространения бегущей волны (рис. 2, см. также [3, с. 102]). В этой установке определяется и длина волны излучения.

Рассмотрим приведенные выше важные моменты по отношению к этому опыту. При отражении электромагнитной волны от проводника вектор электрической напряженности \vec{E} скачком меняет фазу на величину π , а фаза вектора магнитной индукции $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$ остается неизменной. Это связано с тем, что электрические и магнитные компоненты отражаются от проводящей среды не одинаково: электрическое поле не может существовать внутри металла вследствие его хорошей электропроводности, поле в металле равно нулю, то есть у самой поверхности будет узел \vec{E} . В итоге для электрической составляющей волны отражение произойдет с потерей полволны.

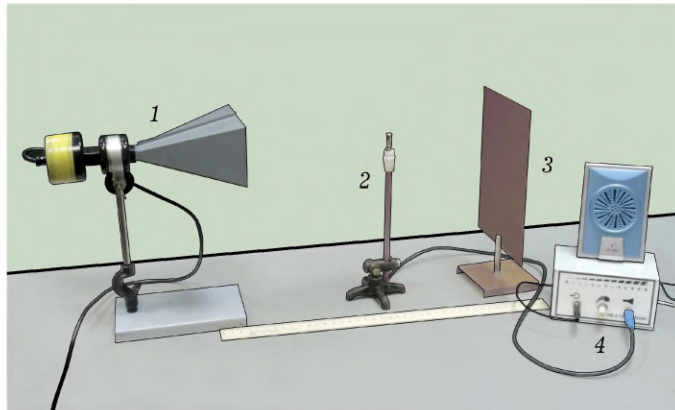


Рис. 2. Получение стоячей электромагнитной волны и определение длины волны излучения: 1 — излучатель, 2 — приемник, 3 — экран, 4 — регистрирующее устройство

Магнитная составляющая волны отражается от поверхности среды без перемены знака и имеет на самой поверхности пучность. Первый узел магнитной индукции \vec{B} будет находиться на расстоянии $1/4$ длины волны от поверхности, второй узел — $3/4$ длины волны и т. д. (рис. 3).

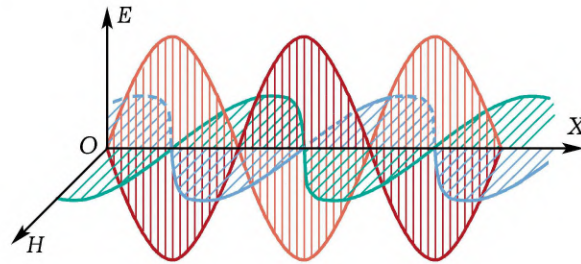


Рис. 3. Стоячая электромагнитная волна при отражении от металлической поверхности

Важно отметить, что физически ситуация на рис. 2 не является одномерной. Результат опыта можно описать, предположив, что за экраном расположен мнимый источник — изображение, дающий отраженные почти сферические волны, образующие вместе с падающими волнами типичную картину двулучевой интерференции. Это легко доказать, перемещая приемник параллельно экрану — будут чередоваться интерференционные максимумы и

минимумы. Поэтому в ходе этой демонстрации не возникает проблем одномерных стоячих волн: узлы и пучности обнаруживаются при любом положении экрана или приемника.

Новая система демонстраций

При всей полезности эксперимента рис. 2, главное свойство стоячих волн — дискретность возможных состояний — остается не рассмотренным. Многие важные свойства стоячих электромагнитных волн также остаются при этой демонстрации не исследованными, например, нельзя показать распределение амплитуды вектора \vec{B} ; обсудить, какие свойства каждой компоненты электромагнитной волны позволяют ее обнаружить, и каким физическим устройством следует воспользоваться? Взаимное расположение пучностей полей \vec{E} и \vec{B} также визуально не представлено в этой демонстрации, как не исследовано и влияние длины волны на распределение узлов и пучностей, поскольку длина волны фиксирована.

Учебная физическая демонстрация при своей организации основывается на существовании, главных свойствах изучаемого явления, во-первых, и, во-вторых, на особенностях восприятия и усвоения учебного физического содержания студентами. Исходя из этого, нами для изучения стоячих электромагнитных волн разработана техника и методика системы демонстрационного эксперимента на катушке Зейбта, предложенной, в частности, И. И. Соколовым для средней школы (!) [4, с. 331].

Катушка Зейбта представляет собой спираль из медного провода в лаковой изоляции (ПЭЛ, ПЭВ-1) диаметром $d = 0,64$ мм (рис. 4). Провод намотан на цилиндрический каркас из диэлектрического материала диаметром $D = 12$ мм. При размере спирали $h = 600$ мм с количеством витков $n = 937$, длина намотанного про-

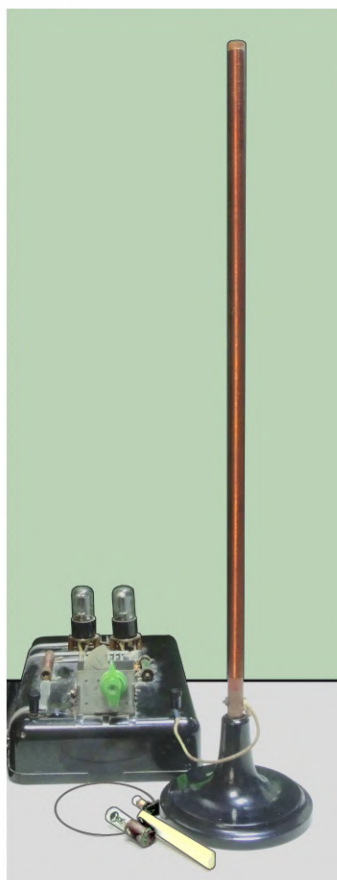


Рис. 4. Общий вид установки: генератор, индикатор и вертикальная катушка Зейбта

вода составляет порядка 35 метров. Один конец катушки закреплен на каркасе, второй конец выведен на клемму и посредством короткого проводника соединен с выходом генератора высокочастотных колебаний.

Провод, намотанный в виде катушки, обладает рядом главных колебаний, поскольку каждый ее участок обладает не только индуктивностью, но и емкостью. Катушка Зейбта представляет собой колебательный контур с распределенными по ее длине емкостью и индуктивностью. При настройке контура генератора в резонанс в катушке возникают колебания, образующие стоячие волны. Частота главных колебаний катушки приблизительно равна частоте, которую имел бы провод, из которого она намотана, если бы он был вытянут в виде линейного осциллятора (в нашем случае для длинной и узкой катушки значение собственной частоты несколько выше, чем у линейного осциллятора).

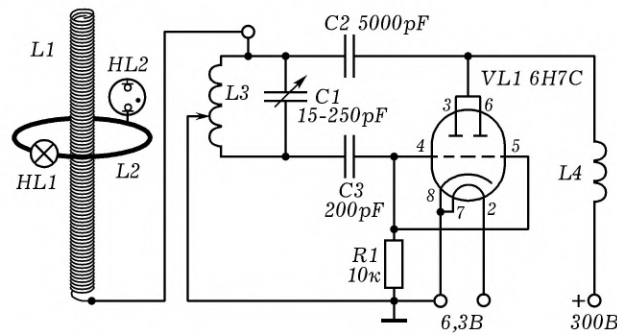


Рис. 5. Принципиальная схема установки для демонстрации стоячих электромагнитных волн

Генератор высокочастотных колебаний (принципиальная схема приведена на рис. 5) собран по трехточечной схеме (Гартлея). В качестве генераторной лампы используется двойной триод 6H7C с параллельно соединенными одноименными электродами, обеспечивая достаточно большую мощность в колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивности $L3$ и конденсатора переменной емкости $C1$. Катушка $L3$ диаметром 50–60 мм изготовлена из медного провода без изоляции диаметром 4 мм и имеет 7 витков с расстоянием 10 мм между ними. Конденсатор переменной емкости $C1$ с воздушным диэлектриком и вариацией емкости от 15 до 250 пФ. Место проводника связи (примерно на середине витков $L3$) подбирается опытным путем. При неудовлетворительной работе генератора подбирают сопротивление утечки сетки $R1$ и емкость сеточного конденсатора $C3$. Анодное на-

пряжение 300 В подается обычным образом через дроссель высокой частоты L_4 , который имеет 150 витков изолированного провода диаметром 0,5–0,6 мм. Он выполнен на картонном каркасе диаметром 12 мм и длиной 80 мм *прогрессивной намоткой* (вначале укладывается виток к витку, а затем, начиная примерно с середины каркаса, расстояние между витками постепенно растет и доходит до 8 мм). Частоту генератора можно изменять от 6 до 15 МГц, что соответствует длинам волн от 50 м до 20 м.

Для увеличения мощности колебаний в схеме используются две лампы 6Н7С, идентичные электроды которых включены параллельно. Повышенная мощность необходима, кроме рассмотренной в статье демонстрации, для демонстрации принципа радиосвязи при подключении вместо катушки Зейбта штыревой антенны. В качестве приемника используется настраиваемый колебательный контур с аналогичной антенной, нагруженный на лампу накаливания 127–220 В мощностью до 25 Вт. Подключение в качестве заземления *провода снижения* увеличивает связь (зажигание лампы) до 3–5 метров.

Для исследования распределения напряженностей полей \vec{E} и \vec{H} вдоль катушки Зейбта L_1 перемещается зонд, представляющий собой виток из провода L_2 , замкнутый на лампочку накаливания HL_1 (2,5 В; 0,068 А) для обнаружения пучностей переменного магнитного поля по создаваемому им максимуму вихревого электрического поля. К витку одним электродом присоединена неоновая лампочка HL_2 (МН–0,7), служащая индикатором пучности поля E (рис. 4, внизу).

Расстояние между двумя наиболее яркими вспышками тех или иных индикаторных лампочек одинаково и равно половине длины волны колебаний, излучаемых генератором. Измерив это расстояние и вычислив длину провода на этом участке, можно определить половину длины волны генератора.

Методическая основа демонстрации

Поскольку основная трудность для студентов состоит в понимании роли граничных условий для создания устойчивой стоячей волны, первая демонстрация носит проблемный характер, создавая ситуацию познавательного интереса и мотивируя учебную деятельность при обсуждении увиденных результатов.

Итак, генератор создает электромагнитную волну вдоль провода, намотанного на катушку, которая, дойдя до конца, отражается и формирует (должна формировать в соответствии с описанной выше системой уравнений) вместе с первичной волной

стоячую волну. Ищем пучности полей \vec{E} и \vec{H} , перемещая индикатор вдоль катушки и... ничего не находим! Нет никаких пучностей. В чем может быть причина? Не работает генератор? Проверяем индикаторами наличие полей на входе в катушку, все нормально, колебания возбуждаются, есть исходная волна, должна быть и отраженная и соответственно, стоячая волна.

Обращаемся к материалу предыдущих лекций по механическим стоячим волнам, обсуждаем, какие ограничения на частоту возбуждаемых колебаний существуют для образования устойчивых состояний? Эти ограничения определяются типами граничных условий. Рассматриваем граничные условия в нашем случае. В отличие от случая с отражением волн от металлического зеркала (рис. 2), где на границе имеется узел электрической компоненты \vec{E} , в этой схеме на конце провода, в верхней точке стойки, при создании устойчивой интерференционной картины образуется узел поля \vec{H} , поскольку сила тока в этой точке равна нулю, и соответственно имеет место пучность для поля \vec{E} . Для колебаний силы тока нижний конец открыт, что соответствует пучности силы тока в нижней точке схемы. Поэтому на длине проволоки для возникновения устойчивой интерференционной картины стоячей волны должно уместиться $(n/2 + 1/4)$ длин волн. Это накладывает соответствующие ограничения на частоту возбуждаемых колебаний, которая может регулироваться конденсатором $C1$ (рис. 5). Но как узнать, что мы подобрали необходимую частоту, в какой точке искать доказательства наступления резонанса?

Обращаем внимание, что есть одна точка, положение которой фиксировано, это вершина катушки, в которой в резонансе должен наблюдаться максимум амплитуды колебаний напряженности, то есть пучность поля \vec{E} . Вращаем регулятор емкости, удерживая неоновую лампу, индикатор поля \vec{E} , вблизи вершины, добиваясь свечения (рис. 6.1). Есть резонанс! Далее надо доказать существование пучности поля \vec{H} . Она должна быть на четверть длины волны смещена относительно пучности \vec{E} . Смещаем индикатор магнитного поля вниз, по свечению лампы накаливания наблюдаем пучность поля \vec{H} через расстояние, равное $1/4$ длины волны (рис. 6.2), как и должно быть! Опускаем индикатор еще на четверть длины волны и вместо лампы накаливания загорается неоновая лампа (рис. 6.3). Оцениваем длину волны, ее отношение с указанным выше диапазоном длин волн. Студенты самостоятельно делают расчеты, убеждаясь в правильности полученных оценок.

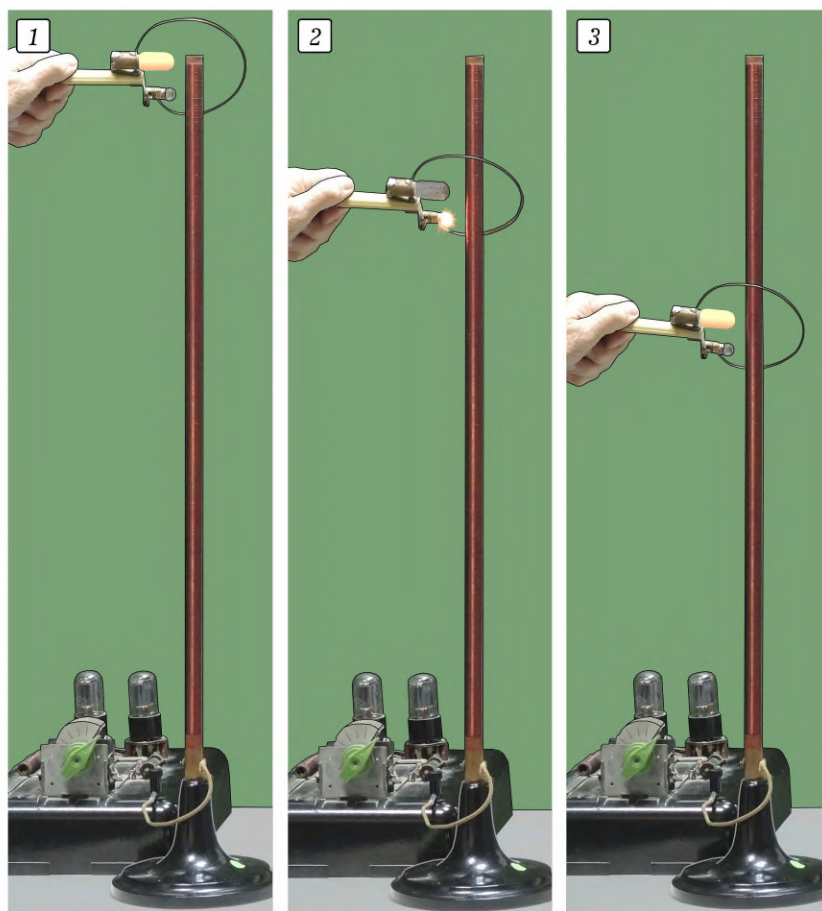


Рис. 6. Обнаружение стоячей волны в катушке Зейбта: 1, 3 — пучности напряженности электрического поля \vec{E} ; 2 — пучность напряженности магнитного поля \vec{H}

В ходе дальнейшей демонстрации смещаем виток $L2$ с индикаторными лампами вдоль катушки $L1$, наблюдаем последовательность чередующихся пучностей электрического и магнитного поля (рис. 7). Эта демонстрация также предваряется вопросами к студентам, предсказанием и обсуждением наблюдаемых эффектов. Особенно обращаем внимание на пучность поля \vec{H} в нижней точке катушки, то есть максимум силы тока, необходимой для закачки энергии.

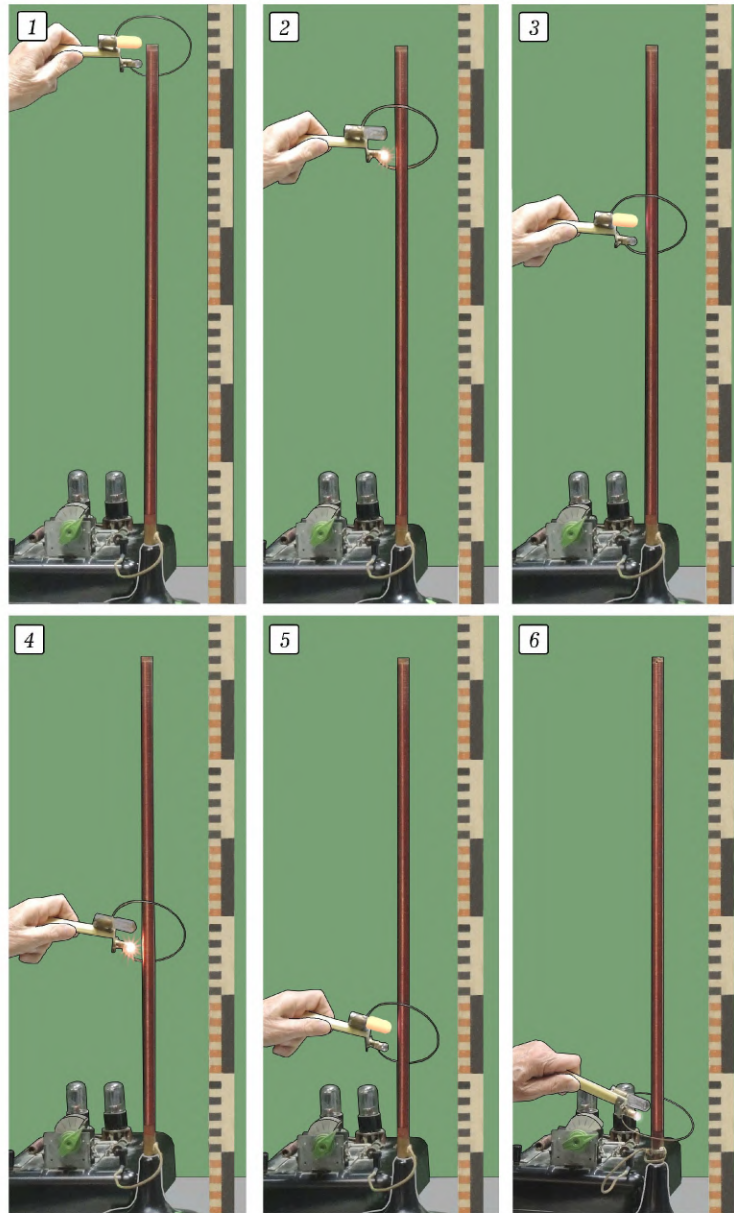


Рис. 7. Перемещение зонда вдоль катушки Зейбта в $5/4$ длины электромагнитной волны: 1, 3, 5 — пучности поля \vec{E} ; 2, 4, 6 — пучности поля \vec{H}

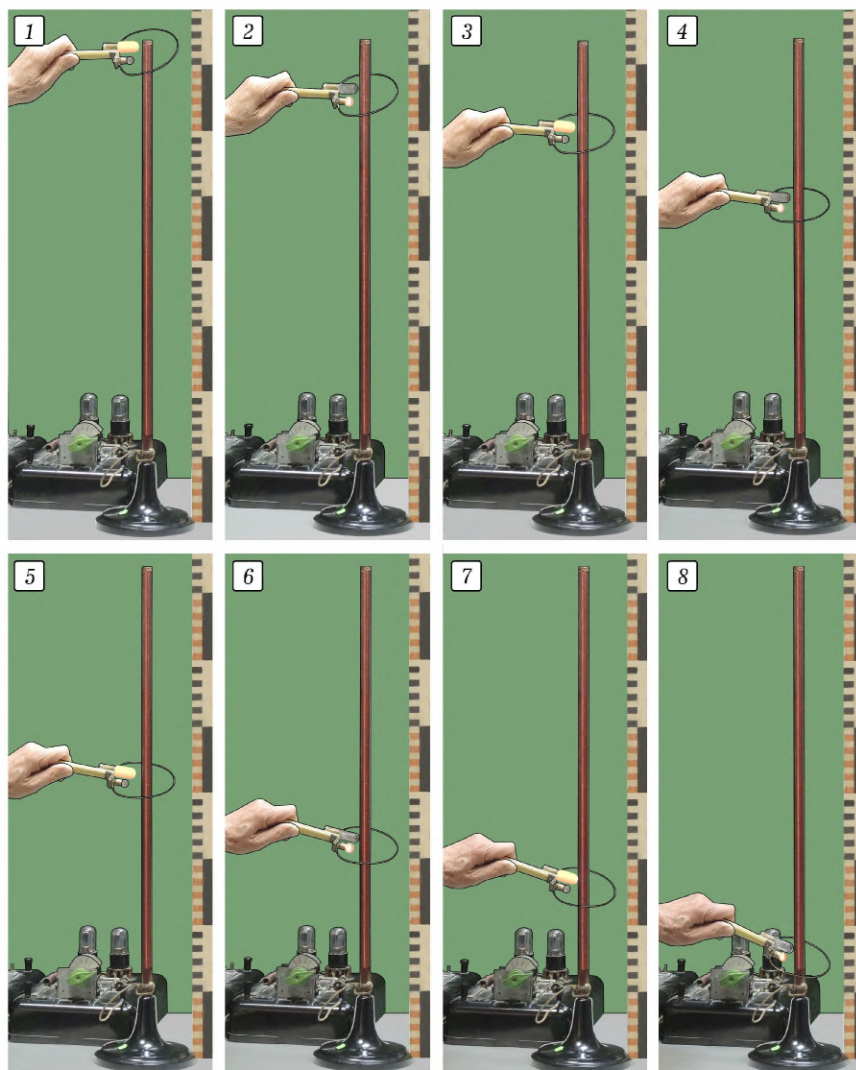


Рис. 8. Фрагменты последовательного перемещения зонда вдоль катушки Зейбта (длина катушки $7/4$ длины электромагнитной волны): 1, 3, 5, 7 — пучности напряженности электрического поля \vec{E} ; 2, 4, 6, 8 — пучности напряженности магнитного поля \vec{H}

На следующем этапе проведения эксперимента мы на глазах студентов уменьшаем емкость конденсатора (см. рис. 8, внизу), тем самым уменьшая длину волны, предлагая предсказать сме-

щение наблюдаемых максимумов свечения индикаторов, что далее хорошо видно при проведении демонстрации (рис. 8).

Заключение

Таким образом, в ходе демонстрации, студенты, опираясь на знания основ электродинамики и теории колебаний, предсказывали результаты опытов, обсуждали и проверяли свои знания наблюдением. Учитывая, что в дальнейшем студенты в лаборатории изучают распространение электромагнитных волн в линии Лехера, рассмотренная демонстрация создает необходимую наглядную основу выполнения практической работы и окончательного усвоения этой сложной теории.

При подготовке работы к публикации возникла дискуссия, можно ли считать приведенный эксперимент подлинно электромагнитной волной, поскольку в основе лежат вынужденные колебания тока в катушке $L1$ (рис. 5)?

Обсуждая аналогичные опыты, А. А. Эйхенвальд писал 100 лет назад «Проволоки же в наших опытах, при малом их сопротивлении, не мешают распространению волн и не изменяют их скорости заметным образом, но они направляют эти волны по желаемому нам пути, подобно тому, как рупор направляет акустические волны; без этого направляющего действия волны распространялись бы во все стороны, и плотность энергии их уменьшалась бы вместе с увеличением расстояния от источника» [5, с. 480].

ЛИТЕРАТУРА

1. Miller K. et al. Role of physics lecture demonstrations in conceptual learning // Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. — 2013. — Vol. 9. — 020113. DOI: 10.1103.PhysRevSTPER.9.020113
2. Иродов И. Е. Волновые процессы. Основные законы. — М.: Бином, 2007.
3. Шахмаев Н. М. и др. Физический эксперимент в средней школе. — М.: Просвещение, 1991.
4. Соколов И. И. Методика преподавания физики в средней школе. — 4-е изд., перераб. — М.: Учпедгиз, 1959.
5. Эйхенвальд А. А. Электричество. — 5-е изд. — М.; Л.: Государственное издательство, 1928.

Национальный исследовательский
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского

Поступила в редакцию 22.01.24.