

УДК 681.7

Интерактивная система дистанционного обучения теоретическим основам электронной оптики магнитных линз

И. В. Мельник, А. О. Лунтовский

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
Киев, Украина

Рассмотрены особенности программной реализации системы дистанционного обучения основам электронной оптики магнитных линз. Приведены основные физические соотношения для длинных и коротких магнитных линз, положенные в основу модели при реализации системы. Система реализована с использованием клиент-серверной архитектуры, причем серверная часть написана на языках программирования Perl и PHP, а для визуализации модели на машинах клиента используется язык программирования трехмерной графики VRML 2.0. Приведены результаты моделирования, полученные для длинной, короткой линзы и для системы линз.

Системы дистанционного интерактивного обучения находят все более широкое применение с развитием глобальной всемирной компьютерной сети Интернет. Достоинства таких систем — массовость и демократичность, простота и наглядность подачи материала, включая возможность самостоятельно пройти все этапы обучения — от изучения теоретических основ, через наработку основных умений и навыков и контроль знаний, к самостоятельному решению нетривиальных творческих задач.

Основная проблема создания таких систем обучения состоит, прежде всего, в предметной области, в необходимости формирования библиотек параметрических моделей для визуализации изучаемого объекта [1—3]. Использование в системах дистанционного обучения средств визуализации моделируемых физических явлений, включая сложную трехмерную графику, позволяет упростить понимание материала и развить у обучаемого практические навыки, необходимые для самостоятельного решения творческих инженерных задач. Однако большинство известных обучающих систем ориентированы все же на изучение простых явлений и законов физики, а не на развитие инжекторных навыков по проектированию реальных устройств и систем. Тем не менее, и в этих системах средства визуализации развиты достаточно слабо [3].

Другая важная проблема состоит в том, что проведение большого объема вычислений при решении задач моделирования на WWW-серверах приводит к значительной перегрузке сети и снижает скорость доступа к приложениям. Потому на сегодняшний день важно получить эффективную и экономичную реализацию для обучающей Интернет-системы.

Авторами была разработана и внедрена в учебный процесс Национального технического университета Украины "КПИ" (г. Киев) система дистанционного обучения основам электронной оптики магнитных линз E-Optics. Выбор объекта моделирования был обусловлен сложностью понимания студентами процесса фокусировки при трехмерных спиралевидных траекториях частиц в магнитных линзах. Использование систем магнитных линз в разнообразных электронных приборах требует кропотливого изучения этого вопроса со стороны студентов. Применение средств моделирования и визуализации трех-

мерных геометрических объектов при изучении электронной оптики магнитных линз значительно облегчает задачи преподавателя и способствует развитию у обучаемых творческих навыков по проектированию сложных электронно-оптических систем.

Система E-Optics построена по архитектуре "клиент—сервер" и ориентирована на сервер HTML приложений Apache. Серверная часть реализована на скриптинг-языках Perl, PHP и языке описания трехмерных сцен VRML 2.0 (Virtual Reality Modeling Language) [1, 2] и поддерживает одновременно расчет параметров визуализации и графический интерфейс пользователя [2]. В состав обучающей системы входят следующие компоненты: теоретические сведения в виде сложного гипердокумента и подсистемы контроля знаний и моделирования. Подсистема моделирования предназначена для исследования движения электронов в длинной и короткой магнитных линзах или в системе из нескольких линз. При построении математических моделей линз использовались известные аналитические соотношения для расчета магнитных полей и траекторий частиц [4, 5]. Допускается возможность одновременного просмотра нескольких траекторий. Параметры модели и алгоритмы визуализации реализованы на языке VRML. Результаты моделирования линз передаются на клиентский компьютер, где происходит визуализация. Система доступна в Интернет по адресу: <http://cad.ntukpi.kiev.ua/e-optics/> с помощью стандартных WWW-браузеров Netscape Navigator и Internet Explorer. Для просмотра результатов моделирования на компьютере клиента должны быть установлены VRML-браузеры Cosmo Player, World View или Cortona VRML Client [1, 2].

Постановка задачи моделирования

Для системы обучения E-Optics нами были реализованы упрощенные модели длинных и коротких магнитных линз. При этом акценты были сделаны на использовании средств трехмерной визуализации, возможности конструирования прототипов реальных систем из нескольких линз и на создания библиотек моделей систем линз, что крайне важно для развития у обучаемых навыков инженерного мышления [6].

В длинной магнитной линзе, система параметров которой приведена ниже, магнитное поле в пределах линзы считалось однородным [4, 5].

Параметры модели длинной магнитной линзы: длина линзы — L ; радиус линзы — R ; индукция магнитного поля — B ; ускоряющее напряжение — U ; угол влета электрона в линзу — α ; координаты точки влета — x_0, y_0 .

Следовательно, зная угол влета частицы в линзу α , можно определить ее координаты x_e и y_e :

$$x_e(t) = x_c - r \cos \varphi(t) = x_0 + \frac{mV}{eB} \sin \alpha \left(1 - \cos \frac{eBt}{m} \right),$$

$$y_e(t) = y_c - r \sin \varphi(t) = y_0 + \frac{mV}{eB} \sin \alpha \sin \frac{eBt}{m},$$

где

$$\omega = \frac{eB}{m}, \quad \varphi(t) = \omega t = \frac{eBt}{m}, \quad x_c = x_0 + r, \quad y_c = y_0.$$

x_0, y_0 — начальные координаты электрона; e — заряд электрона; m — его масса; α — угол влета.

Для расчета координат электрона в короткой магнитной линзе использовался известный приближенный метод расчета траектории, основанный на аппроксимации решения парааксиального уравнения движения в аксиально-симметричном магнитном поле [4, 5]:

$$r = A \cos \left[\left(\frac{eB_{zn}^2}{8mU} \right)^{1/2} (z - z_n) \right] + C \sin \left[\left(\frac{eB_{zn}^2}{8mU} \right)^{1/2} (z - z_n) \right],$$

где

$$A = r_n, C = \frac{dr}{dz_n} \left(\frac{8mU}{eB_{zn}^2} \right)^{1/2},$$

где U — ускоряющее напряжение; n — текущая итерация.

Угол поворота электрона φ вычисляется итерационно по формуле

$$\varphi_n = \sqrt{\frac{eB_{zn}^2}{8mU}} (z_{n+1} - z_n).$$

Закон распределения магнитного поля $B(z)$ для короткой магнитной линзы записывался в виде

$$B(z) = \frac{B_{\max}}{1 + (z/a)^2}.$$

Для моделирования более сложных электронно-оптических систем, состоящих из нескольких линз, необходимо задать тип каждой из них, их геометрические параметры и расстояние между ними. В подсистеме моделирования предусмотрена возможность просмотра траекторий нескольких частиц с разными скоростями и координатами влета. Такая визуализация способствует развитию у обучаемых навыков инженерного проектирования реальных электронно-оптических устройств.

Особенности программной реализации обучающей системы

Основными требованиями, предъявляемыми к обучающим компьютерным системам, являются качество обучения, скорость и эффективность передачи знаний и массовость. Безусловно, что для обеспечения высокого качества обучения такие системы должны включать средства моделирования [3]. Лучшим показателем массовости обладают системы, разработанные для функционирования в WWW. Преимуществом создания моделей физических явлений и объектов, доступных в сети, является то, что множество пользователей могут получать доступ к модели или даже построить собственную модель с заданными параметрами, если она допускает параметризацию. Не исключается также возможность создания пользователем собственных библиотек моделей. Для этого необходимо ввести на WWW-странице необходимые параметры рассчитываемой и визуализируемой модели и передать эти данные на сервер по протоколу HTTP. Сервер производит расчет моделируемой системы и возвращает на машину клиента результаты моделирования, пригодные для визуализации. Диаграмма обмена данных между клиентом и сервером в такой системе приведена на рис. 1.

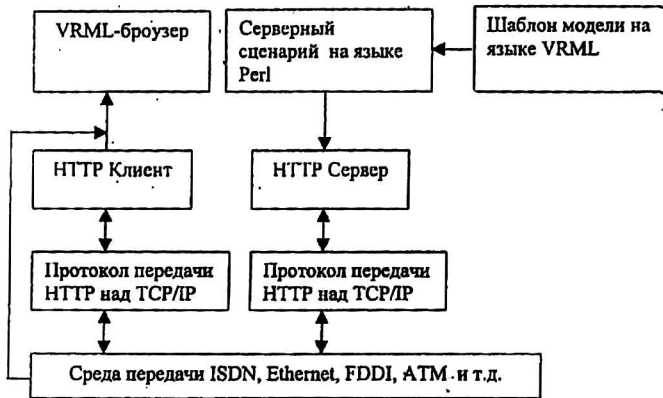


Рис. 1. Схема обмена данными между компьютерами сервера и клиента при программировании сценариев на языке VRML 2.0

Для разработки динамических WWW-приложений успешно используются скриптинг-языки Perl, PHP, VBScript (Microsoft Active Server Pages) или язык Java в виде сервлетов (Sun Java Server Pages). При этом вычислительная нагрузка при работе с системой обучения должна быть рационально распределена между сервером и клиентом, ведь не секрет, что серверные машины высших учебных заведений зачастую недостаточно мощны и перегружены. Особенно это касается программ на языке Java, который в настоящее время является распространенным языком программирования сетевых приложений. При проектировании системы E-Optics этот фактор был учтен.

Мы остановили свой выбор на использовании комбинации языков HTML, JavaScript, PHP, Perl и VRML. Для хранения данных применена СУБД MySQL. На серверной стороне используются операционная система Linux и сервер приложений Apache Web-Server. Для просмотра динамических Web-страниц системы E-Optics применимы клиентские программы Web-браузеры Netscape Communicator и Internet Explorer, а также VRML-браузеры CosmoPlayer, World View или Cortona VRML Client. Используемый подход предполагает формирование на сервере сценариев моделирования (в нашем случае VRML-сценария) по введенным параметрам модели (вводятся на клиентской стороне с помощью HTML-формы). Для формирования VRML-сценария используется серверный скриптинг-язык (в нашем случае выбран Perl). Затем выполняется передача динамически построенного VRML-сценария клиенту (VRML-браузеру) для визуализации. Пользователь строит систему линз, вводит параметры модели и видит на экране конечный результат в виде трехмерного представления движения электронов.

Использование данного подхода значительно перераспределяет нагрузку серверной и клиентской машин и не предъявляет к последним чрезмерных требований. Минимальные требования к аппаратным и программным средствам компьютера клиента: IBM PC совместимый компьютер, процессор Intel-166 MMX или K5-166, 16 Мб ОЗУ, 2 Мб видеопамати, наличие видеоакселератора не обязательно, ОС Windows-95, а также инсталлированный WWW-браузер со средствами поддержки VRML.

Важной особенностью рассматриваемой реализации является ориентация на свободно распространяемые в сети бесплатные средства программирования, что снижает себестоимость разработки программного обеспечения. С нашей точки зрения, для учебных целей достаточно недорогих решений,

следует избегать использования уникальных пакетов моделирования, ориентированных на использование мощных аппаратных и программных средств, которых у потенциального пользователя обучающей системы может просто не оказаться.

Это и стало одной из причин выбора языка VRML для визуализации явлений электронной оптики магнитных линз. VRML — бесплатное, универсальное многоплатформенное средство моделирования и отображения трехмерных графических объектов [1, 2]. Этот язык включает библиотеку примитивов для отображения трехмерных графических объектов, поэтому для отображения цилиндра, конуса, сферы или эллипсоида на экране программисту достаточно указать только геометрические размеры и координаты моделируемого объекта, характеризующие его положение в пространстве в системе координат (X, Y, Z, η) . Аналогичные средства существуют в VRML для отображения пространственных кривых, например винтовых спиралей. Такие средства описания трехмерных графических объектов значительно упрощают визуализацию движения электрона в магнитной линзе. Для описания сложных пространственных кривых, например, как в случае короткой магнитной линзы, в языке VRML существует возможность сплайн-интерполяции по вычисленным координатам, что позволяет значительно уменьшить вычислительные затраты за счет увеличения шага интегрирования траекторий [7]. Кроме того, язык VRML содержит стандартный интерфейс пользователя для просмотра графических объектов, включающий средства для изменения направления обзора и для фокусировки на объект [1, 2]. Это также значительно упрощает задачу программирования при моделировании трехмерной графики.

Другими важными достоинствами этого языка являются возможность встраивания в описание модели сценариев на языке ECMA Script (Java Script) и внешних классов и библиотек Java. Поэтому VRML стал одним из самых распространенных языков моделирования и отображения трехмерной графики в Интернет, и почти на каждом компьютере установлены соответствующие средства поддержки языка VRML (Cosmo Player, World View, Cortona VRML Client).

Структура обучающей системы и приметы реальных моделей

Обучающая система E-Optics содержит три основных компонента:

- теоретический материал по электронной оптике магнитных линз, организованный в виде гипердокумента, в котором установлены перекрестные ссылки между родственными понятиями и определениями;
- подсистему для расчета траекторий электронов в магнитной линзе или в системе линз и визуализации результатов моделирования в режиме on-line;
- подсистему тестирования по основным вопросам электронной оптики магнитных линз.

Основная страница обучающей системы содержит приведенный на рис. 2, а графический интерфейс, обеспечивающий доступ пользователя ко всем ее разделам. При этом в разделы "Расчет линз" и "Теория" можно зайти и работать в них анонимно, а для тестирования необходимо зарегистрироваться, указав фамилию, имя, отчество и номер зачетной книжки студента. Результаты тестирования могут быть отправлены преподавателю по электронной почте или напечатаны. Важной особенностью подсистемы тестирования является то, что для составления тестов используется выборка из 100 вопросов, из которых тестируемый должен ответить на 10, которые система выбирает по ме-

тоту случайных чисел. На каждый вопрос подсистема дает четыре варианта ответа, среди которых тестируемому необходимо отметить верный. Такой способ опроса значительно снижает вероятность того, что обучаемый при тестировании будет использовать готовые варианты ответов на поставленные вопросы. Допускается также прохождение повторного тестирования при вводе имени и пароля пользователя, однако при этом количество тестов будет зафиксировано в итоговом протоколе системы. Серверные скрипты для подсистемы тестирования реализованы на скриптинг-языке PHP.

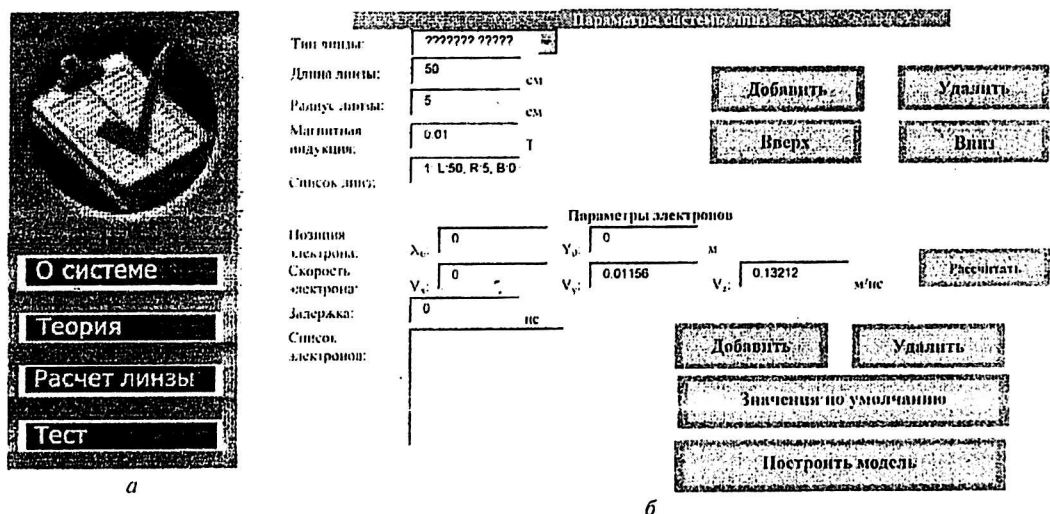


Рис. 2. Входное меню системы:

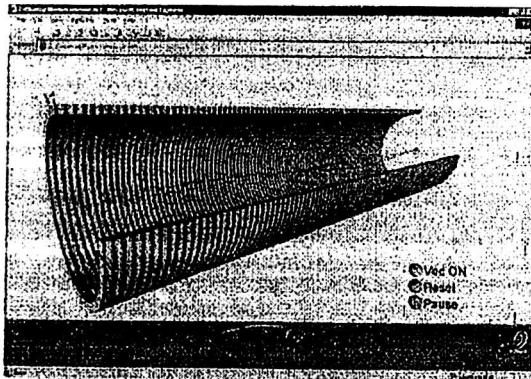
а — дистанционного обучения E-Optics; б — моделирования электронных линз.

Подсистема моделирования включает входное меню для ввода параметров линзы и начальных условий влета электрона. Этими параметрами являются, как указано выше, начальная скорость и угол влета частицы, длина и диаметр линзы, величина магнитного поля. Кроме того, допускается возможность одновременного запуска нескольких частиц с разными начальными скоростями, координатами и углами влета. Такие визуальные модели позволяют обучаемому значительно глубже понять физику процессов, происходящих при движении заряженных частиц в магнитном поле. Для моделирования реальных систем предусмотрена возможность анализа движения электронов в системе из двух или трех линз, находящихся на заданном расстоянии друг от друга. Интерфейс системы моделирования, написанный на скриптинг-языке Perl, приведен на рис. 2, б. При вводе начальных параметров влетающих электронов предусматривалась возможность их задания двумя способами: через составляющие их скоростей и через ускоряющее напряжение и углы влета, что значительно облегчает моделирование и проектирование реальных систем. При обращении к опции меню "Расчитать" в отдельном окне запускается фрагмент программы, написанный на языке Perl, и возникает контекстное меню, приведенное на рис. 3. Аналогичный блок для расчета индукции поля магнитных линз по их геометрическим и электрическим параметрам находится в стадии разработки. Кроме того, разрабатывается подсистема регистрации пользователей для хранения на сервере базы данных с библиотеками моделей с целью их последующей загрузки и использования в процессе обучения.

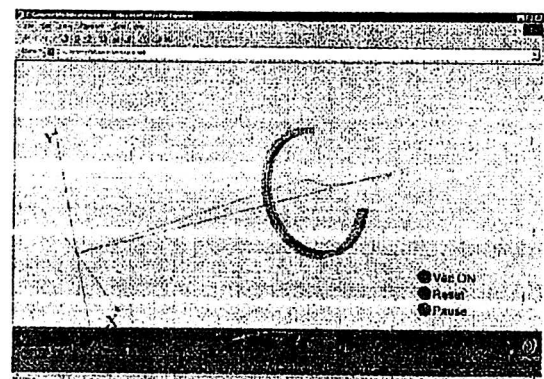
Рис. 3. Окноное меню для расчета параметров влета электрона

Параметры ускорителя	
Ускоряющее напряжение:	<input type="text" value="50"/> кВ
Угол α :	<input type="text" value="90"/> °
Угол φ :	<input type="text" value="5"/> °
Скорость электрона (м/с)	
V_x :	<input type="text"/>
V_y :	<input type="text"/>
V_z :	<input type="text"/>

Результаты моделирования для длинной, короткой линз и для их системы приведены на рис. 4. Для представления результатов был использован стандартный интерфейс системы VRML с возможностью фокусировки камеры на объекте и разностороннего его обзора [1, 2].



a

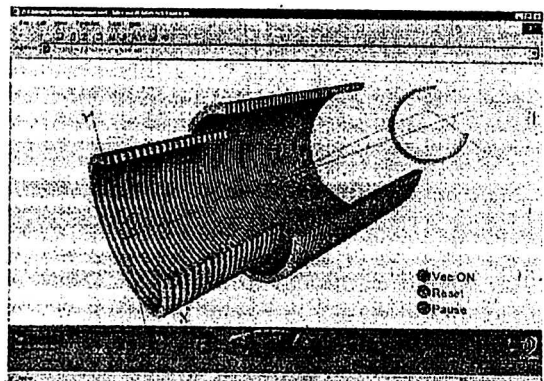


b

Рис. 4. Результаты моделирования:
 а — для длинной линзы: $L = 0,5$ м,
 $R = 0,05$ м, $B = 0,01$ Тл, $U = 10$ кВ,
 $\alpha = 10^\circ$;

б — для короткой линзы: $L = 0,5$ м,
 $R = 0,05$ м, $B_{max} = 0,01$ Тл, $U = 10$ кВ;
 $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 10^\circ$;

в — для системы линз



v

Кроме того, при просмотре результатов моделирования имеется возможность остановки электрона для анализа направления его движения включением вектора скорости с помощью нажатия на интерфейсе кнопки "Vector ON". В процессе визуализации результатов моделирования на экране индицируется время пролета электронов и координаты каждого из них.

Выводы

Системы трехмерного моделирования, построенные на основе предложенного подхода, просты и экономичны в сопровождении, установке и настройке клиентских мест.

Совершенствование разработанной системы обучения и моделирования и создание в ней библиотек моделей реальных электронно-оптических устройств позволит проводить как качественный, так и количественный анализ движения частиц, развивая у обучаемых творческое мышление и навыки инженерного проектирования. Электронный учебник с перекрестными ссылками и подсистема тестирования помогут обучающемуся глубже усвоить и закрепить теоретический материал.

Литература

1. *Tumtel Э., Сандерс К., Скотт Ч., Вольф П.* Создание VRML-миров. — Киев, Изд. группа ВНУ, 1997. — 317 с.
2. *Praktikum Virtuelle Realität//Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Lehrstuhl für Technische Informatik. Prof. Dr.-Ing. Karl-Friedrich Kraiss, Sommersemester 1998, 50 Seiten.*
3. *Kommers P., Aroyo L.* Agents for Computer Learning in Virtual Realities. — *Telematics and Life-Long Learning. Proceedeng of the International Worshope TLLL-2001. October 15—17, 2001, Kyiv, Ukraine.* P. 13—31.
4. *Силады М.* Электронная и ионная оптика. — М.: Мир, 1990. — 640 с.
5. *Хокс П., Каспер Э.* Основы электронной и ионной оптики. Т. 1. Основы геометрической оптики. — М.: Мир, 1993. — 552 с.
6. *Лунтовский А. О., Мельник И. В., Мерхалев Г. С.* Моделирование процессов электронной оптики с использованием web-технологий//*Вестник Херсонского государственного технического университета.* — Херсон, ХГТУ, 2001. Вып. 3 (12). С. 162—167.
7. *Самарский А. А., Гулин А. В.* Численные методы. — М.: Наука, 1989. — 225 с.

Разработанная версия системы обучения и моделирования E-Optics доступна в Интернет по адресу: <http://www.cad.ntu-kpi.kiev.ua/e-optics/>.

On-line distance learning system to study theory of magnetic lenses electron optics

I. V. Melnik, A. O. Luntovsky

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Electronic Faculty, Kiev, Ukraine

Some aspects of program realization of distance learning system for study electron optics in magnetic lenses is presented in article. Basic physical principles realised in model for lenthly and short magnetic lenses are discussed. This system is realised on client-server architecture. Server programs are written on languages Perl and PHP, and client part for visualization of three demansional graph is programmed on language VRML 2.0. Some simulation results have been obtained for lenthly and short lenses as well as for systems of few lenses are presented.