

В ПРИРОДЕ НИЧТО НЕ ПРОИСХОДИТ МГНОВЕННО – ЭТО СПРАВЕДЛИВО И ДЛЯ ЗАКОНА ОМА

Законы Ома и Кирхгофа основываются на стационарных состояниях. Эти законы не дают представления о неизбежных переходных процессах, в результате которых устанавливаются характерные параметры стационарного состояния. Тем не менее, используя программы для имитации процессов, эти процессы можно рассмотреть на занятии, чтобы учащиеся могли глубже понять физическую сущность переходных процессов.

1. СТАЦИОНАРНЫЕ СОСТОЯНИЯ БЕЗ ПЕРЕХОДА МЕЖДУ НИМИ – ПРОБЛЕМА ДЛЯ ПРЕПОДАВАНИЯ

Тема «электрические цепи» – одна из частей учебной программы по физике практически в каждой стране, но, как правило, в рамках этой программы рассматриваются только стационарные состояния, а переходные процессы игнорируются.

В одном из тестов, проводимых в нескольких европейских странах, учащимся предлагалось ответить на следующие вопросы:

- Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из аккумулятора и резистора, в котором протекает ток согласно закону Ома (рис. 1). Если сопротивление резистора внезапно изменяется, то ток изменяется так, чтобы в новом стационарном состоянии он снова удовлетворял закону Ома.

Вопрос: Как происходит переход от одного стационарного состояния к другому? Результат этого теста был, по понятным причинам, отрицательным [1]; большинство учащихся никогда не слышали о переходных процессах.

Переходные процессы в электрических цепях обычно скоротечные и их трудно отследить в ходе эксперимента. Возможно, именно по этой причине, их не включают в учебную программу.

Если в цели преподавания физики входит развитие наблюдательности и точности мышления, такой подход не приводит к успеху. В ходе обучения следует рассматривать не только стационарные состояния, но также обсуждать и следующие вопросы:

- Как аккумулятор «узнает» о том, что сопротивление резистора, находящегося на некотором расстоянии от него изменилось и ток должен подобающим образом измениться?

Или

- Как быстро увеличится ток, если в цепи произойдет короткое замыкание?

Можно ли пренебрегать быстро протекающими процессами? Можно ли рассматривать действие на расстоянии для ответа на подобные вопросы? Если учащиеся не задают таких вопросов, может быть стоит стимулировать их к пониманию, что приводимое для них объяснение причин явлений в электрических цепях без учета переходных процессов является фрагментарным?

Ниже показано, как современные программы моделирования предлагают способ решения вышеописанных проблем.



Рис. 1. Простая электрическая цепь с резистором переменного сопротивления

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

2.1. ДЕМОНСТРАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Демонстрация переходного процесса в цепи с использованием большого конденсатора – довольно наглядный простой эксперимент.

Если лампочки не подключены прямо к источнику напряжения (рис. 2), но включены параллельно с конденсатором, то задержка, вызванная перезарядкой конденсатора, будет хорошо видна.

Для интерпретации этого эксперимента ученикам потребуется знание поведения конденсатора, что, в свою очередь, потребует представления о поверхностных зарядах и знания того факта, что проводники в каждой электрической цепи обладают электроемкостью подобно конденсаторам, и потому перезаряжаются во время каждого переходного процесса.

Эксперимент, показанный в левой части рис. 2, имитирует эксперимент в правой части этого рисунка. Из-за перезарядки емкости проводников, соединяющих лампочку с источником, при каждом включении и выключении лампы возникает, пусть и короткая, но задержка. Конденсатор, подключенный

параллельно только увеличивает площадь поверхности проводящих элементов, что дает возможность лучше наблюдать переходный процесс.

2.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

2.2.1 Программа CLOC – Conceptual Learning Of Circuits (Концептуальное изучение цепей)

Для наглядного изучения переходных процессов во время занятия в классе может помочь программа моделирования CLOC (Концептуальное изучение цепей).

Первоначально эта программа была разработана для более широкого изучения электрических цепей во время занятий в классе и в частности она дает возможность рассмотреть описанный переходный процесс.

Программа позволяет строить простые электрические схемы, включающие в себя источники напряжения, резисторы, интерактивные переключатели и соединяющие элементы (провода). В результате строится график изменения величины силы тока и выводится ее численное значение. В отдельном окне можно видеть трехмерное изображение цепи, показывающее распределение потенциалов над каждым из элементов (рис. 3). Программа CLOC может быть запущена как самостоятельное Java-приложение или как апплет, встроенный в веб-страницу [4].

Алгоритм работы программы основан на так называемой контейнерной модели. В рамках этой модели основой является резистор как таковой, а примыкающие элементы цепи рассматриваются как контейнеры (рис. 4).

После использования описанной процедуры по декомпозиции цепи на отдельные элементы, программа непрерывно определяет разность в содержимых каждых соседних контейнеров ($h_1 - h_2$). Определенный процент, задающийся резистором, от этой разности перемещают из одного контейнера в другой, чтобы достигнуть равномерного распределения. Исключение при этом составляет аккумулятор, так как у него имеются предопределенные отличия от остальных контейнеров.

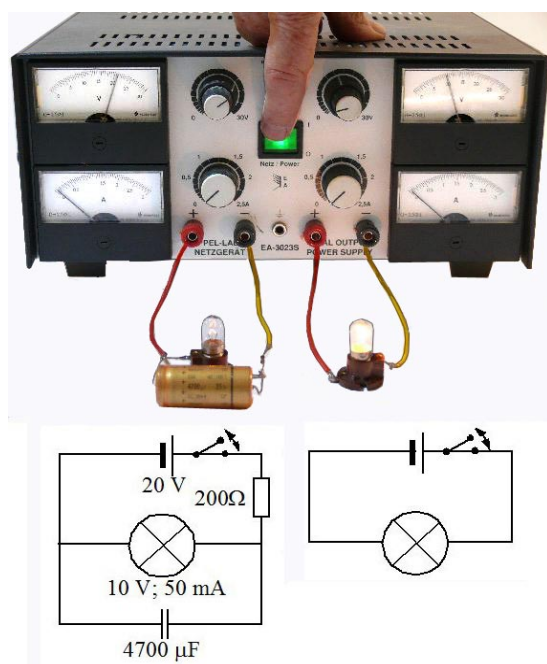
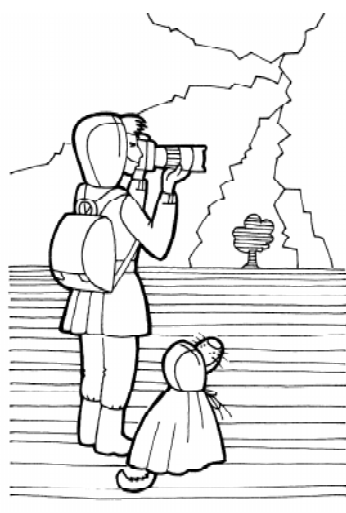


Рис. 2. Демонстрация переходного процесса



Переходные процессы в электрических цепях обычно краткосрочные и их трудно отследить в ходе эксперимента...

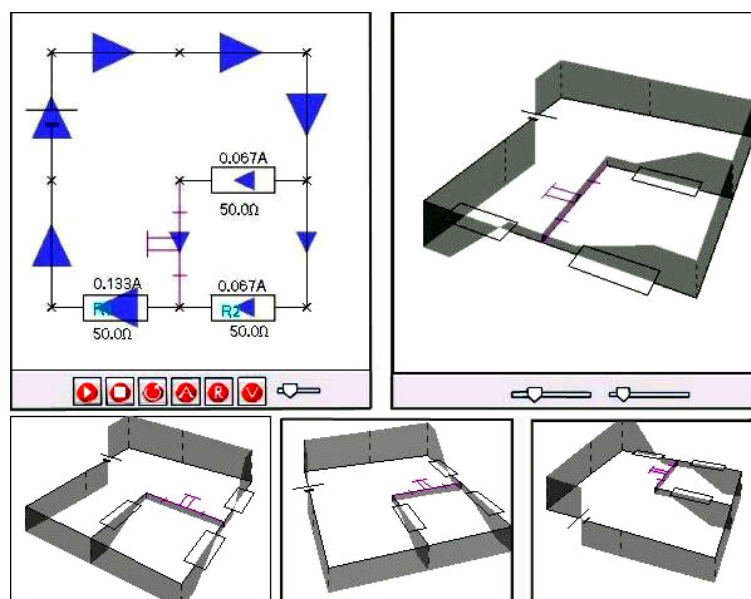


Рис. 3. Скриншоты работающей программы моделирования CLOC

После начала процесса моделирования отличие в содержимом аккумулятора распространяется на все связанные контейнеры в течение нескольких секунд, которые требуются для достижения системой финального стационарного состояния. Финальное состояние во всех случаях согласуется со значениями, полученными экспериментально.

Численные характеристики конечного состояния могут быть определены с помощью законов Кирхгофа, именно этот метод и используется в большинстве программ. С точки зрения преподавания, он, тем не менее, не идеален, так как может быть применен только к стационарным состояниям, к которым система мгновенно возвращается после всякого изменения.

Контейнерную модель можно критиковать исходя из двух соображений:

- Во-первых, продемонстрированная задержка только приблизительно эквивалентна условиям, возникающим в электрических цепях с небольшими конденсаторами, поскольку контейнерная модель не учитывает отражения, которые преобладают в цепях с маленькими конденсаторами.
- Во-вторых, каждый протяженный элемент проводника рассматривается как отдельный контейнер и процессы распространения, происходящие во всех подобных элементах, опускаются.

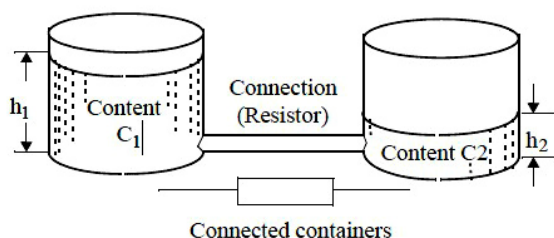
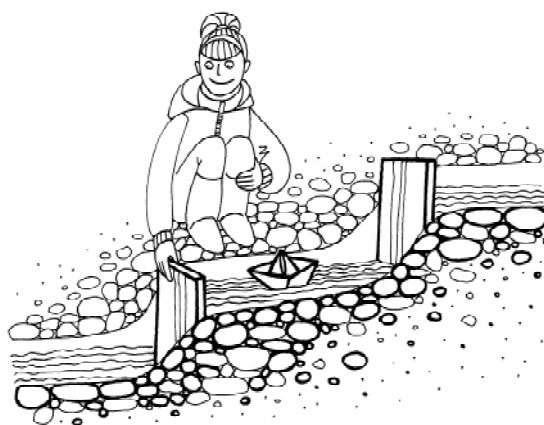


Рис. 4. Модель резистора с двумя соединениями



В рамках этой модели основой является резистор, как таковой, а прилегающие элементы цепи рассматриваются как контейнеры

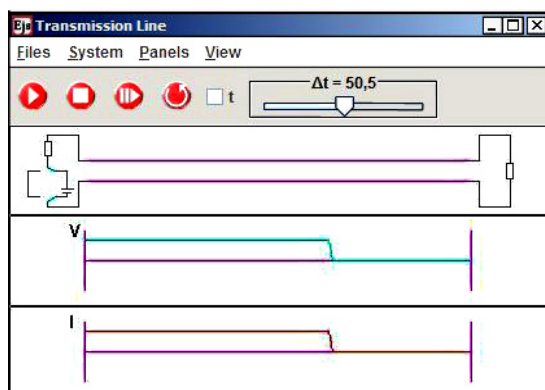


Рис. 5. Процесс протекания постоянного тока на двойной линии

Такие ограничения приемлемы, если переходный процесс в CLOC рассматривается как некоторая аппроксимация, а CLOC рассматривается как техническое средство, использующееся в образовательных целях, чтобы подчеркнуть роль переходных процессов, которые в противном случае остались бы незамеченными.

Существует и другая программа для моделирования – «TL-Transition Line», в которой переходные процессы демонстрируются на прямой двухпроводной линии, все переходы и состояния вычисляются и визуализируются с необходимой точностью. Таким образом, приближенные и упрощенные представления, получаемые с помощью CLOC, могут рассматриваться как промежуточные шаги, предваряющие использование программы TL для демонстрации реального поведения систем.

2.2.2. Программа для моделирования «TL-Transition Line»

Визуализация переходного процесса, происходящего в двухпроводной линии, осуществляется в программе TL-линия передачи (рис. 5).

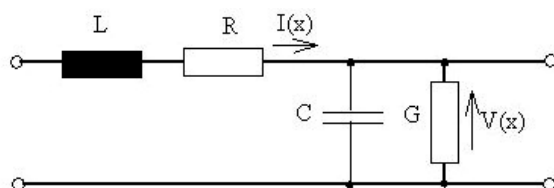


Рис. 6. Элемент двойной линии

Реализованный алгоритм вычисляет численное решение следующих двух дифференциальных уравнений, также известных как «уравнения переноса»:

$$\frac{\partial}{\partial x} I(x, t) = -C \frac{\partial}{\partial x} V(x, t) - V(x, t) G,$$

$$\frac{\partial}{\partial x} V(x, t) = -L \frac{\partial}{\partial x} I(x, t) - I(x, t) R.$$

Эти уравнения могут быть получены из конфигурации, где двухпроводная линия представляет собой последовательность идентичных элементов, как, например, на рис. 6.

В данном случае L обозначает индуктивность элемента, R – сопротивление потерь обоих элементов, C – электрическую емкость между проводниками, G – «утечку» сопротивления ($G = 1/R$).

Двойная линия, используемая программой, состоит из 200 таких элементов, хотя их изображения и нет на экране.

Численное решение этих дифференциальных уравнений, с учетом соответствующих ограничений и начальных условий получено на рис. 5 в виде графиков функций $V(x, t)$ и $I(x, t)$.

Это одномерное решение представлено в виде протяженной линии, вертикальными перепадами которой можно пренебречь. Реализованный алгоритм доказал свою стабильность для всех ограничений и начальных условий, не приводя к неправдоподобным результатам, обусловленным ошибками в численных методах. Программа реали-

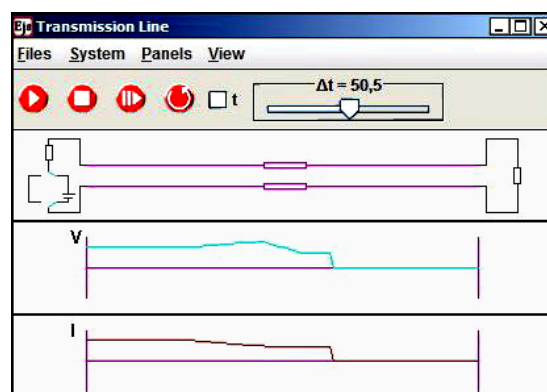


Рис. 7. Переходный процесс в цепи с последовательным соединением

зована на языке Java и может использоваться как отдельное приложение или как апплет на веб-странице [5].

Первоначально программа была разработана в учебных целях для иллюстрации процесса распространения волн в линейных системах [6]. Тем не менее, она также может применяться во время изучения последовательных и параллельных схем. Программа TL позволяет пользователю создавать цепи с параллельным и последовательным соединением и показывает все возможные переходные процессы в реальном времени (рис. 7 и 9).

Два симметрично расположенных резистора посередине двойной линии и нагрузочный резистор в конце образуют последовательное соединение с переменным сопротивлением. Движущиеся перепады напряжения и тока отражаются от концов линии. За этими отражениями можно проследить вплоть до того момента, когда будет снова достигнуто стационарное состояние. Визуальное отображение распределения тока и напряжения вдоль линии передачи с помощью стрелок способствует лучшему пониманию развиваемой концепции (рис. 8).

Резисторы, расположенные посередине двойной линии, можно заменить проводящей областью ограниченной ширины и переменным сопротивлением. Вместе с нагрузочным сопротивлением такая конфигурация представляет собой параллельное соединение, в котором можно наблюдать все пе-

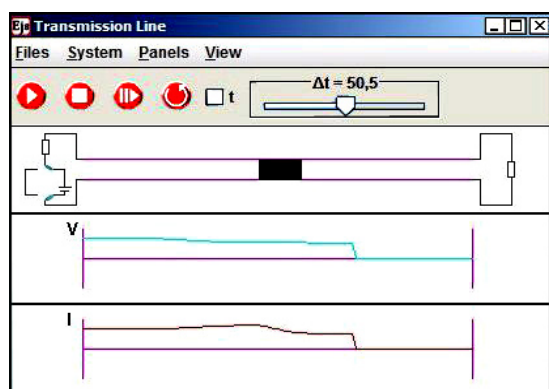


Рис. 9. Переходные процессы при параллельном соединении

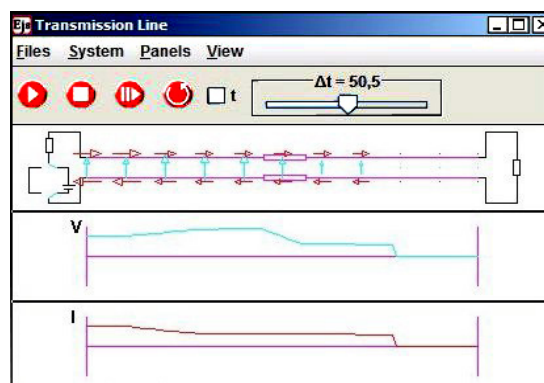


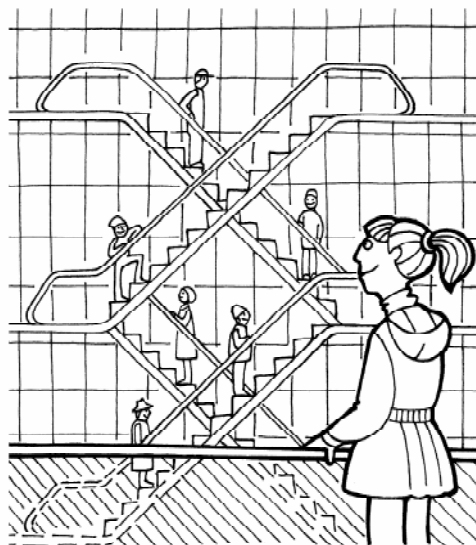
Рис. 8. Индикация направления силы тока и напряженности электрического поля

реходные процессы, пока не будет достигнуто стационарное состояние (рис. 9).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрические цепи в практическом использовании являются очень простой системой. Как правило, достаточно знать приложено ли к сети напряжение или нет, и протекает ли по ней ток, вычисление стационарных состояний не требует знаний специального математического аппарата.

Тем не менее, объяснение и понимание того, как функционируют электрические



...позволяет пользователю создавать цепи с параллельным и последовательным соединением и показывает все возможные переходные процессы в реальном времени...

цепи на самом деле, может вызывать затруднения.

Энергия передается посредством силы и движения, а не посредством переноса обогатенного энергией вещества. Процесс передачи энергии и основные соотношения в системах должны быть понятны учащимся.

Учащиеся должны разобраться, почему возникают поверхностные заряды на каждом проводнике с током, почему эти поверхностные заряды при взаимодействии с электронами проводимости вызывают протекание постоянного тока, и как может быть достигнуто стационарное состояние.

Наконец, учащиеся должны понимать, что стационарные состояния не могут существовать без переходных процессов, характеристики которых также должны быть известны учащимся.

Какой же из этих аспектов стоит изучить во время занятий в классе и насколько подробно стоит говорить о нем?

Этот вопрос можно сравнить с вопросом, упомянутым ранее в статье [7], о степени сложности упражнения при занятии альпинизмом. Не требуем ли мы слишком многого и рискуем не справиться с задачей? Не требуем ли мы малого и рискуем тем, что у учащихся пропадет мотивация к дальнейшим действиям? Такие решения может принимать наш проводник в горах, который знаком со всеми потенциальными опасностями и может оказать помощь в любой критической ситуации.

Применить эту метафору к кабинету физики и обдумать необходимые требования к учителям физики мы предлагаем читателю.

Литература

1. Härtel H. et.al. (2005): Test about Voltage – A Basic Term in Electricity Results. http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/Spannung/voltage_test_result.pdf
2. A video showing this experiment is found under: http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/Lampe_C.htm
3. Härtel H. The so-called Simple Electric Circuit; Computer supported course material. http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/index_e.htm
4. Härtel H., Divjak S. Simulationsprogramm CLOC - Conceptual Learning Of Circuits. Dokumentation: http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/CLOC_doc/CLOC_doc_de/index.htm
5. Härtel H., Martin E. Francisco Esquembre, Simulationsprogramm TL Transportleitung Dokumentation: http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/TL_doc/TL_doc_de/index.htm
6. Härtel H. Transition Processes in Linear Systems: http://http://www.astrophysik.unikiel.de/~hhaertel/index_e.htm
7. Герман Хэртел. Так называемые простые электрические схемы не так уж просты // Компьютерные инструменты в школе, 2013. № 1. С. 5–14.



Наши авторы, 2013.
Our authors, 2013.

*Dr. Herman Hartel,
Университет им. Христиана
Альбрехта, г. Киль, Германия.
Перевод с нем. Курбатовой М.А.
под ред. Бутикова Е.И.*