

БЕРЗАН ВЛАДИМИР И ТЫРШУ МИХАИЛ ВЫПОЛНЯЮТ ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Уважаемые господа, дипломированные энергетики и электротехники, получающие зарплату из госказны!

В монографии Римский В. К., Берзан В. П., Тыршу М. С. Волновые явления в неоднородных линиях. Т. 1. Теория распространения волн потенциала и тока. Под ред. Римского В. К. – Кишинев: Типография АНМ, 1997. – 298 с и в диссертации Берзана В. П./Berzan V. P. Переходные электромагнитные процессы в неоднородных многопроводных линиях представлен алгоритм для решения обратной задачи. Так вот опубликуйте уважаемые господа титулованные ученые сами без меня (Римского В. К.) нормальную статью с примерами расчета волн потенциала и тока в прямом и обратном времени. Не позорьтесь сами, не позорьте меня и не занимайтесь лысенковщиной, перепечатывая убогое старье из тома I. Если не нравятся прилагаемые примеры Mobiasbanca или ПТ с фантастической ошибкой масштабов в 125 порядков, то напрягите свои извилины и предложите что-то свое. В качестве дополнения опубликуйте принципиальную схему молниевывода, замкнутого на согласованное сопротивление, и дайте определение волнового сопротивления и согласованной нагрузки для многопроводной ЛЭП специально для академиков Постолатия В. М и Бутырина П. А. Впрочем, Постолатию В. М. все это давно до матовой лампочки, а вот Бутырина П. А. взял за шкуру Глазьев С. Ю., потребовав ответов на некоторые из сформулированных вопросов в викиучебнике **PaPuRi – алгоритм, инновации, матрица**. Издайте препринты или даже книгу. Сослаться достаточно на тома 1-5 или на что хотите и как хотите. Если доктор наук не в состоянии освоить и повторить все то, что ему нарисовали в его же диссертации, то он не доктор, а рекламная пустышка, о чем мы поведаем всему миру

Cei care au privilegiul de a sti, au datoria de a actiona. A. Einstein

Итак, минимум 3 статьи, по которым надо срочно защитить хотя бы одну кандидатскую диссертацию, которая ничем не хуже того бреда в виде «Проективной геометрии» Пенина А. Если вы не в состоянии или

не хотите этого сделать, то будет проведена пресс-конференция, на которой потребуем лишить Берзана В. П. докторской степени, которую он получил только за перевод с русского на румынский том I. Потребуем вернуть в бюджет и несправедно полученные деньги в виде зарплаты из госбюджета. Зарплату вернет и научный консультант Римский В. К./Rimschi V. X. в наказание за беспринципность и очковтирательство. К тому же мы имеем дурную привычку публиковать и тиражировать на весь мир все что пишем. Для расширения аудитории в ближайшее время начнем озвучивать в YouTube многие интересные вещи вместе с Тофилат Серджиу, Штефан Глигор и др., в том числе про молдавскую электроэнергетику и юстицию.

Римский Валентин/Rimschi Valentin/Doctor PaPuRi

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ ДЛЯ БЕРЗАНА ВЛАДИМИРА И ТЫРШУ МИХАИЛА

Статья № 1: Молниеотвод, замкнутый на согласованное сопротивление

Скачать:

www.euroliberali.md PaPuRi–тесты, метод, молниеотвод, шифратор

Домашнее задание

А зачем вообще нужен в молниеотводе спуск и участок заземления? Почему бы молниеприемник не замкнуть на согласованное с ним активное сопротивление? Ведь должен же существовать режим бегущих волн, когда вся подводимая к нему энергия молнии будет им полностью или почти полностью поглощаться. Почему бы, не создать своеобразную ловушку для тока в виде длинной линии и одного сосредоточенного сопротивления, экспериментально испытал ее подключением к источнику постоянного напряжения или тока. Вряд ли удастся отследить нестационарный волновой процесс с нуля в виде мгновенных значений напряжения и тока в наносекундном диапазоне, но хоть что-то измерить в микросекундном диапазоне, наверное, можно.

Здесь сразу возникает вопрос: чему равно волновое сопротивление линии длиной 40 см? Волновое сопротивление защитного троса длиной в 125 метров и расположенного параллельно земле на высоте скажем 16 м вычислить можно достаточно точно. К примеру, оно равно 897 Ом. Однако чему оно окажется равным, если трос расположить перпендикулярно, да еще частично погрузить в грунт на 16 м? Похоже, погонные реактивные параметры ориентированной перпендикулярно земле линии окажутся зависящими от продольной координаты x . В принципе это не проблема для **PaPuRi** – алгоритма, но как корректно задать первичные параметры составной линии для такой задачи пока не совсем понятно.

Статья № 2: Примеры расчета волн потенциала и тока в прямом и обратном времени

1. Телеграфные уравнения и безразмерные величины

Передача электромагнитной энергии по длинной линии с помощью токов проводимости описывается хорошо известными телеграфными уравнениями, представляющими собой законы Кирхгофа для замкнутого контура, образованного участком цепи длиной dx :

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0; \quad C \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0. \quad (1.1)$$

Первичные параметры, взятые за единицу длины линии, следующие:
 L , Гн/м – индуктивность петли, образованной прямым и обратным проводами;

C , Ф/м – поперечная емкость между прямым и обратным проводами;

R , Ом/м – продольное активное сопротивление;

G , См/м – поперечная активная проводимость утечки изоляции между прямым и обратными проводами (в качестве обратного провода чаще всего используется земля).

Заметим, что все составляющие в первом уравнении имеют размерность В/м, а во втором – А/м.

Двухпроводные и коаксиальные линии является наиболее широко используемыми на практике продольно-регулярными направляющими структурами, в которых энергия распространяется в виде поперечных электромагнитных волн (Т - волны). Как известно, поле Т - волны в

поперечном сечении совпадает со стационарным полем в той же структуре, а токи в проводниках протекают только в продольном направлении (токи проводимости). Поэтому можно рассматривать традиционные в электротехнике величины (напряжение между проводниками u и силу тока в проводнике i) и проводить анализ “волн” напряжений и токов в линии на основе телеграфных уравнений.

1.1. Начальные и граничные условия

Для выделения единственного решения систему (1.1) следует дополнить граничными и начальными условиями. Пусть линейная незаряженная электрическая цепь (рис. 1.1) в начальный момент времени $t = 0$ подключается к внешнему источнику напряжения неограниченной мощности:

$$u = U_0(t) \text{ при } x = 0, \quad (1.2)$$

а ее приемный конец замкнут на активно-реактивную нагрузку в виде последовательной RLC – цепочки:

$$u = R_s i + L_s \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_s} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad \text{при } x = l. \quad (1.3)$$

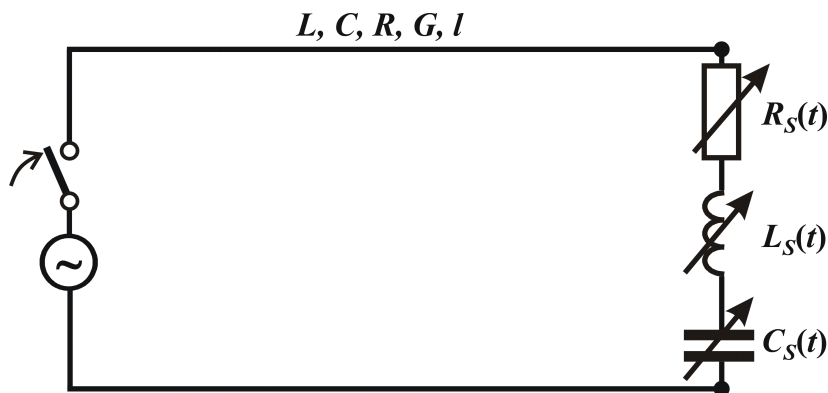


Рис 1.1. Электрическая цепь, состоящая из источника напряжения, односторонней длинной линии с погонными параметрами L, C, R, G и сосредоточенной RLC – нагрузкой на приемном конце.

Очевидно, что при $R_s = L_s = 0$, $C_s = \infty$ получаем режим короткого замыкания: $u = 0$, а условие $R_s = \infty$ соответствует холостому ходу линии: $i = 0$ (нагрузка отключена). Подобные вырожденные нагрузки (ХХ или КЗ) на практике встречаются сравнительно редко, однако их изучение представляет несомненный интерес как исходная ступень при переходе к реальным (невыврожденным) нагрузочным режимам. Начальные условия задачи, как правило, полагаются нулевыми (до коммутации электрический заряд в цепи отсутствует).

При отборе мощности, включение компенсирующих и других устройств в промежуточных точках линии $x = x_n$, токи и напряжения как функции пространственной переменной x могут испытывать разрывы первого рода или другие скачки. Однако интегро-дифференциальное соотношение (1.3) не меняется по форме, если в него подставить $i = i_1 - i_2$ и $u = u_1 - u_2$, где нижние индексы означают значения функций слева и справа от точки подключения. Заметим, что активно-реактивные сосредоточенные нагрузки могут состоять из произвольного набора последовательно и параллельно соединенных RLC – звеньев. В этом случае граничные зависимости становятся более громоздкими, но важно, чтобы они оставались линейными, поскольку тогда решение всегда существует и оно единственно

1.2. Многопроводные (многофазные) ЛЭП

Система линейных уравнений (1.1) относится к гиперболическому типу [9], что автоматически подразумевает конечные скорости распространения электромагнитных волн, определяемые через погонные параметры линии по формуле $a = \pm 1/\sqrt{LC}$. В случае многопроводной линии, – а таковыми являются все ВЛ высокого напряжения, – когда L , C – симметричные квадратные матрицы собственных и взаимных индуктивностей и емкостей, скоростям волн соответствуют собственные числа матрицы

$$A = \begin{vmatrix} 0 & L^{-1} \\ C^{-1} & 0 \end{vmatrix}.$$

Здесь необходимо отметить очень важный на наш взгляд момент. Нередко при расчете многопроводных линий используются такие пер-

вичные параметры, при которых скорости электромагнитного излучения оказываются выше скорости света в вакууме, что вряд ли можно считать корректным. Например, в [4] для семипроводной линии приведены следующие значения для матриц L и C :

$$L = \begin{pmatrix} 1.828 & 0.274 & 0.274 & 0.274 & 0.274 & 0.274 & 0.274 \\ 0.274 & 1.634 & 0.217 & 0.364 & 0.364 & 0.364 & 0.364 \\ 0.274 & 0.217 & 1.634 & 0.364 & 0.364 & 0.364 & 0.364 \\ 0.274 & 0.364 & 0.364 & 1.634 & 0.217 & 0.364 & 0.364 \\ 0.274 & 0.364 & 0.364 & 0.217 & 1.634 & 0.364 & 0.364 \\ 0.274 & 0.364 & 0.364 & 0.364 & 0.364 & 1.634 & 0.217 \\ 0.274 & 0.364 & 0.364 & 0.364 & 0.364 & 0.217 & 1.634 \end{pmatrix} \text{ мГн/км,}$$

$$C = \begin{pmatrix} 6.620 & -0.601 & -0.601 & -0.601 & -0.601 & -0.601 & -0.601 \\ -0.601 & 7.540 & -0.414 & -1.160 & -1.160 & -1.160 & -1.160 \\ -0.601 & -0.414 & 7.540 & -1.160 & -1.160 & -1.160 & -1.160 \\ -0.601 & -1.160 & -1.160 & 7.540 & -0.414 & -1.160 & -1.160 \\ -0.601 & -1.160 & -1.160 & -0.414 & 7.540 & -1.160 & -1.160 \\ -0.601 & -1.160 & -1.160 & -1.160 & -1.160 & 7.540 & -0.414 \\ -0.601 & -1.160 & -1.160 & -1.160 & -1.160 & -0.414 & 7.540 \end{pmatrix} \text{ нФ/км}$$

Если вычислить собственные числа матрицы A :

$$\begin{aligned} a_{1,2} &= \pm 374660 \text{ км/с}, & a_{3,4} &= \pm 298510 \text{ км/с}, & a_{5,6} &= \pm 307030 \text{ км/с}, \\ a_{7,8} &= \pm 307030 \text{ км/с}, & a_{9,10} &= \pm 297870 \text{ км/с}, & a_{11,12} &= \pm 297870 \text{ км/с}, \\ a_{13,14} &= \pm 297870 \text{ км/с}, \end{aligned}$$

то окажется, что три пары скоростей распространения электромагнитного возмущения оказываются больше скорости света в вакууме.

В [5] приведены матрицы погонных параметров управляемой самокомпенсирующейся воздушной линии УСВЛ 500/500 кВ:

$$L = \begin{vmatrix} 1.4786 & 0.8260 & 0.8260 & 1.0396 & 0.8402 & 0.8402 \\ 0.8260 & 1.4786 & 0.8260 & 0.8402 & 1.0396 & 0.8402 \\ 0.8260 & 0.8260 & 1.4786 & 0.8402 & 0.8402 & 1.0396 \\ 1.0396 & 0.8402 & 0.8402 & 1.4786 & 0.8260 & 0.8260 \\ 0.8402 & 1.0396 & 0.8402 & 0.8260 & 1.4786 & 0.8260 \\ 0.8402 & 0.8402 & 1.0396 & 0.8260 & 0.8260 & 1.4786 \end{vmatrix} \text{ мГн/км.}$$

$$C = \begin{vmatrix} 18.4475 & -0.89672 & -0.89672 & -6.67739 & -1.8393 & -1.8393 \\ -0.89672 & 18.4475 & -0.89672 & -1.8393 & -6.67739 & -1.8393 \\ -0.89672 & -0.89672 & 18.4475 & -1.8393 & -1.8393 & -6.67739 \\ -6.67739 & -1.8393 & -1.8393 & 18.4475 & -0.89672 & -0.89672 \\ -1.8393 & -6.67739 & -1.8393 & -0.89672 & 18.4475 & -0.89672 \\ -1.8393 & -1.8393 & -6.67739 & -0.89672 & -0.89672 & 18.4475 \end{vmatrix} \text{ нФ/км}$$

Собственные числа матрицы A для данной линии следующие:

$$a_{1,2} = \pm 388170 \text{ км/с}, \quad a_{3,4} = \pm 165570 \text{ км/с}, \quad a_{5,6} = \pm 255810 \text{ км/с}, \\ a_{7,8} = \pm 284450 \text{ км/с}, \quad a_{9,10} = \pm 302000 \text{ км/с}, \quad a_{11,12} = \pm 302070 \text{ км/с}.$$

И в этом случае скорости распространения волны оказываются больше скорости света, поэтому такие исходные данные также являются некорректными, а следовательно, вопрос правильного задания матриц L и C для многопроводных ЛЭП продолжает оставаться открытым и по сей день.

Результаты исследований для однопроводной линии не так то просто распространить на многопроводные электрические цепи. Как правило, в справочной литературе для многофазной линии приводятся усредненные значения распределенных параметров, которые принимаются по значению равными для всех фаз линии. Это позволяет заменять, например, трехфазную линию однопроводной и проводить для данной схемы соответствующие расчеты режима и процессов. В принципе, такая замена некорректна даже для установившегося синусоидального режима ЛЭП без потерь, работающей на согласованную нагрузку. Что такое согласованная нагрузка для однопроводной линии с произвольными потерями – понятно и физически реализуемо. В общем случае это комплексное сопротивление Z_S , потребляющее (поглощающую) всю активную и реактивную мощность, подведенную к нему электромагнитными волнами.

В то же время, симметричная матрица волновых сопротивлений $Z = L^{1/2} C^{-1/2}$ идеальной многопроводной линии, в которой присутствует взаимовлияние проводов, будет состоять из ненулевых элементов и чтобы обеспечить режим бегущих волн на приемном конце линии должны выполняться граничные условия: $u = Zi$. Физически это означает, что между фазами должны быть включены ненулевые активные сопротивления, чего никогда не используется на практике. Кроме того, можно построить пример для линии с потерями, когда некоторые элементы матрицы Z будут вещественными и отрицательными и, стало быть, необходимо включить дополнительные источники ЭДС между фазами, чтобы получить согласованную нагрузку.

Если есть взаимовлияние проводов, то для одноцепной трехфазной линии неизбежно уменьшается натуральный ток и соответственно натуральная мощность линии. Для реальной полуволновой линии без учета потерь натуральная мощность понижается минимум на 4...5%, а для линии с потерями и КПД уменьшается по сравнению со случаем, когда не учитывается взаимное влияние проводов фаз. Следовательно, замена трехфазной линии однопроводной моделью является достаточно грубым приближением и может использоваться только для прикидочных расчетов.

Домашнее задание

Начнем с отдыха, который равносителен перемене вида деятельности. Такой финансовый инструмент как сложные проценты основатель династии Ротшильдов (самый богатый человек в мире для своего времени) назвал восьмым чудом света. А он знал, о чем говорит. Сегодня семейство Ротшильдов владеет состоянием в \$3 трлн. Сумма вложенных под сложные проценты денег стремительно начинает возрастать в геометрической прогрессии. Повлияли ли сложные проценты на ускорение научно-технического прогресса на планете Земля? Наверное, ДА. Секрет сказочного обогащения от Ротшильда в немалой степени способствовал и формированию новой виртуальной реальности, которая по мощности уже превосходит мощность материального мира.

Уже в VIII веке до н. э. существовали ростовщики и даже некие аналоги современных акций и векселей. Но в XXI веке эмиссия первичных ценных бумаг и их деривативов вышла из-под контроля, поскольку их стоимость в 20 000 и более раз превосходит стоимость реальных материальных активов и услуг в масштабах всей планеты.

Финансовые инструменты усложнились настолько, что, например, особо продвинутые трейдеры научились покупать электроэнергию (виртуально) ночью и продавать днем, когда она несколько дороже, получая при этом немалую реальную прибыль. Как это у них получается, мы пока понять не можем.

Apple, Google, Microsoft, YouTube, Wikipedia и др. наряду со сложными процентами, безусловно, тоже следует отнести к чудесам человеческой цивилизации, ускоряющими научно-технический прогресс и стремительно повышающими мощность виртуальной действительности (матрицы). Компания Google, основанная в 1998 буквально с нуля двумя студентами Ларри Пейдж и Сергей Брин, уже спустя десятилетие получила чистую прибыль в \$6.7 млрд., что в 1.5 превосходит объем импорта-экспорта такой страны как Молдова. К настоящему времени капитализация пятерки высокотехнологичных гигантов Apple, Google, Microsoft, Facebook и Amazon достигла тех же \$3 трлн., что и у семейства Ротшильдов.

Ну, что ж, давайте равняться на самые успешные мировые бренды. Может и нам, используя их в качестве ориентиров, удастся хоть немного ускорить научно-технический прогресс на планете и пополнить мировую сокровищницу знаний, какой стала Свободная энциклопедия – Википедия. Запущенная в мае 2001 Джимми Уэйлсом и Ларри Сэнгером она стала одной из самых больших и бесплатных веб-энциклопедий, которая охватывает практически все новости с разнообразных отраслей. Сайт wikipedia.org финансируется и поддерживается Фондом Викимедиа, который работает на общественных и международных пожертвованиях для лучших работников и исследователей. Каждый день Википедию просматривают около 70 200 000 пользователей, что приносит доход \$1.5 млрд. По объёму сведений и тематическому охвату Википедия считается самой полной энциклопедией из когда-либо создававшихся за всю историю человечества. Интернет-сайт всемирной энциклопедии является пятым по посещаемости сайтом в мире после Google, Facebook, YouTube, Windows Live (microsoft.com).

С Википедии мы и начнем. Если сравнить статью «Телеграфные уравнения» в различных языковых разделах интернет-энциклопедии, то вырисовывается несколько странная, на наш взгляд, картина. Только в англоязычном разделе есть графики решения телеграфных уравнений о распространении прямоугольного импульса напряжения по идеальной линии и линии с потерями, которые мы воспроизводим здесь 1:1

Наверное, прагматичным американцам они нужнее, чем остальным. Конечно же, там нет никаких ссылок на монографию [18]: **Круг К. А.** Переходные процессы в линейных электрических цепях. – М. – Л.: ГЭИ, 1948. – 344с, где впервые было получено точное решение этой задачи для полубесконечной линии с потерями: $L = C = 1$; $R = 2$, $G = 0$. Но почему подобных графиков нет в русскоязычном разделе Википедии? Почему список цитируемой там литературы ничего, кроме недомыслия не вызывает. Впрочем, судите сами:

- *John D. Kraus. Electromagnetics. — Third. — New York, NY: McGraw-Hill, 1984. — ISBN 0070354235., pp. 380—419*
- \uparrow *William H. Hayt. Engineering Electromagnetics. — Fifth. — New York, NY: McGraw-Hill, 1989. — ISBN 0070274061., pp. 382—392*
- \uparrow *Stanley V. Marshall. Electromagnetic Concepts & Applications. — Second. — New York, NY: Prentice-Hall, 1987. — ISBN 0132490048., pp. 359—378*
- \uparrow *Matthew N. O. Sadiku. Elements of Electromagnetics. — First. — Orlando, Florida: Saunders College Publishing, 1989. — ISBN 993013846., pp. 497—505*
- \uparrow *Rodger F. Harrington. Time-Harmonic Electromagnetic Fields. — First. — New York, NY: McGraw-Hill, 1961. — ISBN 0070267456., pp. 61-65*
- \uparrow *John J. Karakash. Transmission Lines and Filter Networks. — First. — New York, NY: Macmillan, 1950., pp. 5-14*
- \uparrow *Georges Metzger. Transmission Lines with Pulse Excitation. — First. — New York, NY: Academic Press, 1969., pp. 1-10*
- \uparrow *Matthew N. O. Sadiku. Elements of Electromagnetics. — First. — Orlando, Florida: Saunders College Publishing, 1989. — ISBN 993013846., pp. 501—503*
- \uparrow *Stanley V. Marshall. Electromagnetic Concepts & Applications. — Second. — New York, NY: Prentice-Hall, 1987. — ISBN 0132490048., pp. 369—372*
- \uparrow *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов, 13-е издание. М.: Наука, 1986.*

Почему учебники по ТОЭ и электроэнергетике в ссылках совсем не фигурируют? Почему в данной статье нет закона сохранения (1.4) для телеграфных уравнений? Почему о многопроводных ЛЭП даже не

упоминается? Почему отсутствует формула расчета реактивной мощности длинной линии? Почему только в японском разделе Википедии предпринята робкая попытка вывода уравнений длинной линии без потерь ($R = G = 0$) в качестве следствия из уравнений Максвелла?

$$\mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{E} + \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0;$$

$$\mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{H} + \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0.$$

Отрадно, что хоть у японцев есть ссылка на классические работы по математической физике:

Courant, R.; Hilbert, D. (1953), *Methods of mathematical physics, I*, New York, N.Y.: Interscience Publishers, Inc., [ISBN 0-471-50447-5](#), [MR 0065391](#)

Courant, R.; Hilbert, D. (1962), *Methods of mathematical physics, II*, New York, N.Y.: Interscience Publishers, Inc., [doi:10.1002/9783527617234](#), [ISBN 0-471-50439-4](#), [MR 0140802](#)

В арабском разделе Википедии наше внимание привлёк рисунок, поясняющий вывод дифференциальных уравнений (1.1):

Неплохо выглядит и анимационный график в каталонском разделе:

В эпоху глобализации информация не только интенсивно создается, но и интенсивно уничтожается. Выглядит парадоксально, но ситуация не меняется со времен рабовладельческого строя. Имеются исторические свидетельства, что уже тогда паровой двигатель мог бы быть доведен до стадии промышленной эксплуатации и поставлен на службу человечеству. Но этого не произошло, в основном, из-за страха правящих классов перед возможными негативными последствиями массовой безработицы среди рабов [3]. У греков и римлян были и паровая машина, и гидравлические насосы, и самовар, просто они были игрушками для детей. А применять их для промышленности никому в голову не приходило: зачем, когда есть «рабы, чтобы молчать, и камни, чтобы строить»?

Столь же парадоксальной представляется и новая парадигма, связанная с формированием и сосуществованием двух глобальных противоборствующих тенденций в финансово-экономической сфере деятельности нашей цивилизации. С одной стороны на планете накопилось слишком много денег при явном дефиците новых идей, заставляющих эти деньги работать на реальное материальное производство, а не на безудержное наращивание спекулятивного капитала. С другой стороны стремительно растет количество «замороженных» патентов на изобретения и открытия, в том числе и в области энергетики. Отчасти это связано с тем, что в мировой рыночной экономике для продвижения тех или иных продуктов на рынок затрачивается примерно в 7 раз больше времени и средств, чем на их создание. Поэтому несколько лет приходится работать за бесплатно, чтобы заинтересовать потенциальных работодателей и покупателей.

В свете вышеизложенного сформулируем следующие задания не только для студентов, аспирантов, операторов научных рот, но и для авторов лучших в мире учебников по ТОЭ и электроэнергетике [15, 64, 71]: Демирчяна К. С., Коровкина Н. В., Бутырина П. А., Рыжова Ю.П. и др.

Задание № 1.

1.1. Перевести параграф 1, на стандарты Википедии, где используется специальный язык разметки формул. Например, в Latex, для формулы

Задание № 2.

Записать уравнения Максвелла в виде канонической системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка гиперболического типа и определить скорости волн потенциала и тока в тонкой пластине и толстой плите, например, из алюминия или стали. С этой целью удобно рассмотреть приведенную во введении задачу из учебников [14, 15] о распространении блуждающих электромагнитных волн по длинной линии, заменив последнюю на тонкую пластину (панель) или толстую плиту из того же токопроводящего материала.

Задание № 3.

Разместить в русскоязычном разделе Википедии графики из монографии [18], дополненные примерами решения уравнений длинной линии с переменными параметрами. В наличии имеется огромный выбор численных результатов по данной тематике. Приведем лишь некоторые из них [8, 9].

Д_1.3.1. Единичный скачок напряжения на входе полубесконечной линии с потерями

В [18] дано точное решение нестационарной задачи о движении прямоугольной волны потенциала и тока по полубесконечной линии с реактивными параметрами $L = C = 1$ и активными потерями $R = 2$ при идеальной изоляции $G = 0$, обеспечивающей отсутствие тока утечки через нее. На рис. Д_1.3.1 показаны безразмерные временные диаграммы токов в фиксированных точках наблюдения: $x = 0; 0.5; 1; 1.5; 2; 3$ (кривые 1–6) при единичном скачке напряжения $u = U_0 = 1$ на входе линии $x = 0$.

Вследствие необратимой диссипации энергии скачок тока на переднем фронте падающей волны постепенно уменьшается (вплоть до полного исчезновения) по мере ее распространения с постоянной скоростью $a = 1$ вдоль проводника. Поскольку для параметров линии выполняется условие: $RL > GC = 0$, то помимо диссипации имеет место дифракция электромагнитных волн, которая и порождает некоторую немонотонность изменения во времени мгновенных значений тока в самой отдаленной от источника точке наблюдения 6.

Волновую картину следует дополнить эпюрами напряжений и тока (кривые 1; 2), соответствующие следующим четырем моментам времени: $t = 1; 2; 3; 4$ (см. рис. Д_1.3.2). Из этих иллюстраций видно, что на переднем фронте волны безразмерные амплитуды напряжения и тока всегда совпадают, тогда как за фронтом, ток явно отстает от напряжения. С увеличением потерь ($R = 5$) это отставание становится все заметнее (см. рис. Д_1.3.3). Для неискажающей линии ($RL = GC = 2$), когда в линии присутствует только диссипация волн, функции напряжения и тока совпадают как это видно из функций на рис. Д_1.3. 4.

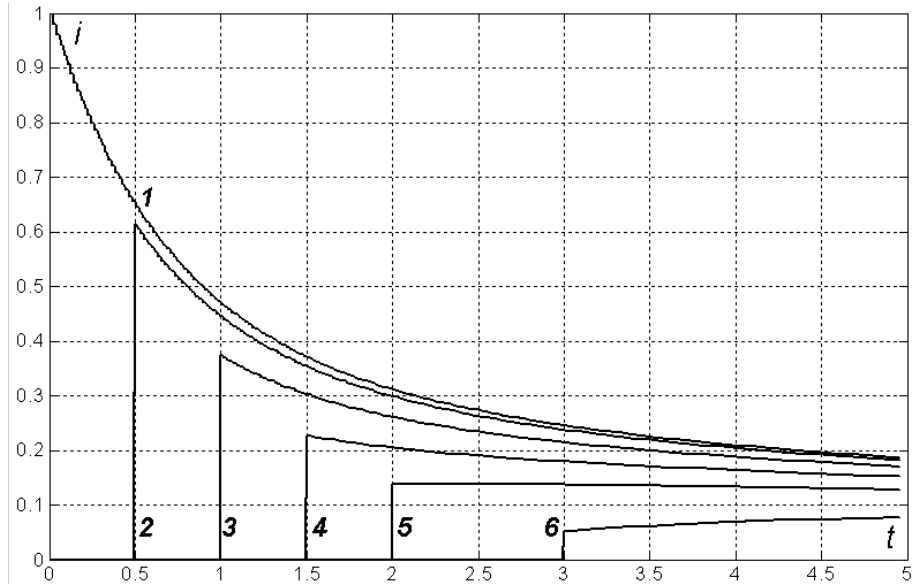
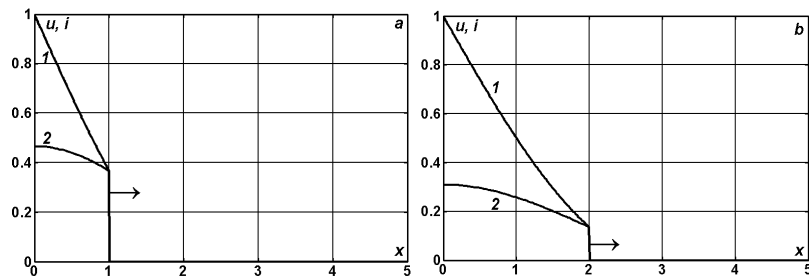


Рис. Д_1.3.1. Динамика токов в линии с потерями: $L = C = 1$; $R = 2$, $G = 0$. Кривые 1-6 соответствуют точкам наблюдения $x = 0; 0.5; 1; 1.5; 2; 3$.

Если утечка тока через изоляцию достаточно велика: $RL < GC = 5$, то это приводит к увеличению значений тока по сравнению с таковыми для напряжений (см. рис. Д_1.3.5). Отличительной особенностью рассмотренных здесь случаев является то, что скорость перемещения фронта волны уменьшается практически до нуля, а электромагнитное возмущение перестает распространяться вглубь проводника. В электрической цепи устанавливается равновесное состояние, когда вся энергия источника поглощается нагрузкой в виде отрезка полубесконечной линии.



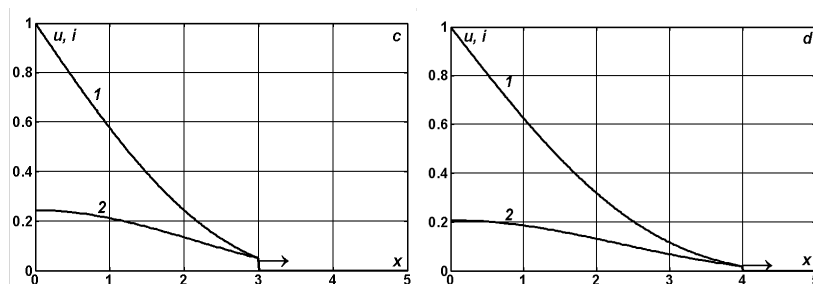


Рис. Д_1.3.2. Деформация формы прямоугольной волны при ее распространении по линии с потерями: $R = 2$, $G = 0$. Моментам времени $t = 1$; 2; 3; 4 соответствуют графики *a-d*.

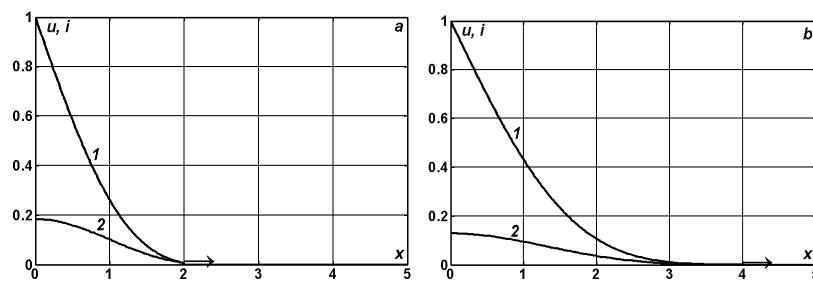


Рис. Д_1.3.3. Деформация формы прямоугольной волны при ее распространении по линии с потерями: $R = 5$, $G = 0$. Моментам времени $t = 2$; 4 соответствуют графики *a; b*.

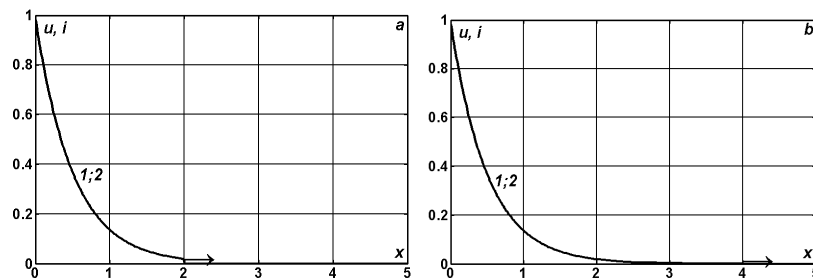
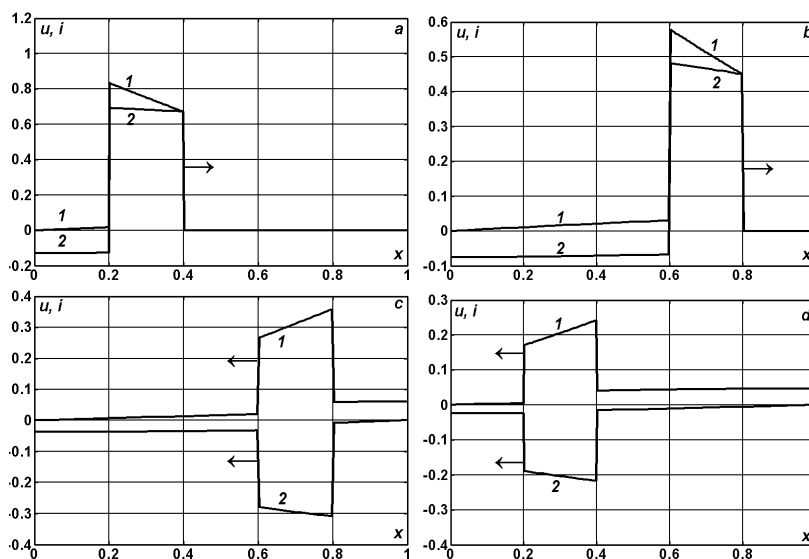


Рис. Д_1.3.4. Деформация формы прямоугольной волны при ее распространении по линии с потерями: $R = G = 2$. Моментам времени $t = 2$; 4 соответствуют графики *a; b*.

Д_1.3.2. Распространение прямоугольного импульса по линии с открытыми и короткозамкнутыми концами

На рис. Д_1.3.6 представлены профили напряжения и тока (кривые 1, 2) при воздействии в точке $x = 0$ монополярного импульса ограниченной длительности $\Delta t \leq 0.2$. После окончания времени действия внешнего возмущения левый конец линии считается короткозамкнутым, а правый – открытым. В отличие от идеальной или неискажающей линии дифракция волн создает ненулевой фон (шум), который постепенно усиливается с течением времени.

Отражение волн от разомкнутого конца линии приводит к изменению полярности тока, а ее отражение от короткозамкнутого конца меняет знак напряжения на противоположный. Вследствие необратимых потерь энергии в линии амплитуда электромагнитного импульса постепенно уменьшается до нуля.



Д_1.3.4. Синусоида напряжения на входе линии, замкнутой на сосредоточенную емкость

Приведем несколько примеров, существенно ограничивающих, на наш взгляд, область применения символического метода. Используя УУР в гиперболических функциях (1.6) невозможно рассчитать переходной процесс, который всегда носит явно выраженный несинусоидальный характер. Однако, как видно из приведенных в таблице числовых данных метод комплексных амплитуд дает неверные результаты и для установившихся вырожденных режимов в идеальных цепях. Даже для короткозамкнутой полуволновой и разомкнутой четвертьволновой линии с нулевыми входными сопротивлениями, когда имеет место резонанс напряжений, результаты, строго говоря, неверны. В этом случае амплитуда токов в начале линии стремится к бесконечности, но сами токи не являются синусоидальными, а кусочно-синусоидальными, как это следует из точных решений.

Таблица Д_1.3.1. Ударные и установившиеся значения амплитуд тока в начале линии синусоидального напряжения в зависимости от ее длины и потерь в ней при ХХ и КЗ.

l	R_s	R	G	$ I_0 _{\text{уд}}$	$ I_0 _{\text{yc}}$	$ I_0 _{\text{уур}}$
1/2	∞	0	0	1.00	1.00	0.00
		0.48	0.48	1.00	0.2355	0.2355
		0.48	0.096	1.00	0.1428	0.1428
	0	0	0	∞	∞	∞
		0.48	0.48	4.2464	4.2464	4.2464
		0.48	0.096	6.9855	6.9855	6.9855
1/4	∞	0	0	∞	∞	∞
		0.48	0.48	8.3733	8.3733	8.3733
		0.48	0.096	13.8992	13.8992	13.8992
	0	0	0	1.00	1.00	0.00
		0.48	0.48	1.00	0.1194	0.1194
		0.48	0.096	0.97	0.0717	0.0717
1/8	∞	0	0	2.00	2.00	1.00
		0.48	0.48	1.77	1.00	1.00

l	R_s	R	G	$ I_0 _{\text{уд}}$	$ I_0 _{\text{yc}}$	$ I_0 _{\text{уур}}$
	0	0.48	0.096	1.85	0.9979	0.9979
		0	0	2.23	2.23	1.00
		0.48	0.48	2.03	1.00	1.00
		0.48	0.096	2.03	0.9993	0.9993
1/16	∞	0	0	0.7050	0.7050	0.4142
		0.48	0.48	0.7400	0.4153	0.4153
		0.48	0.096	0.7720	0.4142	0.4142
	0	0	0	4.93	4.93	2.41
		0.48	0.48	4.44	2.41	2.41
		0.48	0.096	4.44	2.41	2.41

УУР дают ошибочные результаты и для идеальной линии, замкнутой на чисто реактивную нагрузку, не содержащей активные (диссипативные) элементы. Весьма характерным является следующий пример. Пусть на входе линии с длиной $l = 0.488$ действует синусоидальное напряжение, а к ее приемному концу подключена сосредоточенная емкость $C_s = 1$.

На рис. Д_1.3.10 изображена зависимость от времени напряжения и тока (кривые 1; 2) в начале линии с параметрами: $R = G = 0$ (а); $R = 5G = 0.48$ (б). В линии с потерями режим устанавливается спустя 10 пробегов волны по длине линии (0.2 с в реальном масштабе времени). На стадии установления ток изменяется по синусоидальному закону с той же частотой что и напряжение. В этом случае амплитуду тока и фазовый сдвиг относительно напряжения можно определить по методу комплексных амплитуд. Однако для идеальной линии колебание тока во времени носит достаточно замысловатый характер довольно далекий от синусоидального. Очевидно, что если формально воспользоваться здесь символическим методом, то получим явно неверный результат.

И последнее замечание. Длительность нестационарных процессов пропорциональна длине линии и существенно увеличивается с уменьшением потерь в ней. Например, для рассмотренных здесь случаев время выхода на установившийся режим достигает долей секунды, и это обстоятельство уже нельзя игнорировать как второстепенный фактор,

влияющий на распространение электромагнитной энергии в линии. Также не следует забывать, что всякий установившийся процесс является следствием нестационарных явлений и любое волновое движение следует рассчитывать с нулевого начального состояния, предшествующего включению линии на постоянное или переменное напряжение.

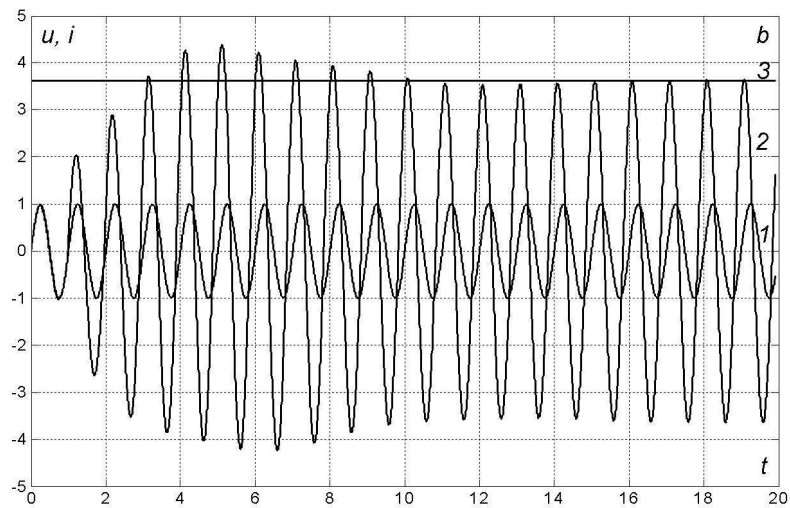
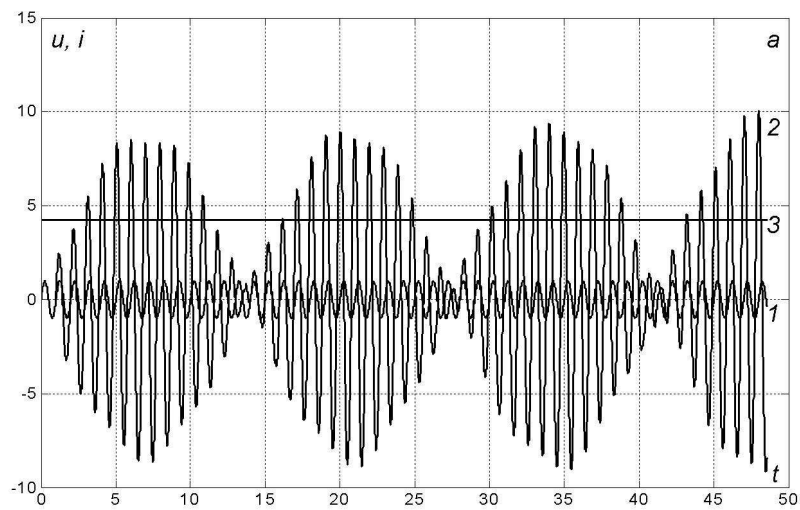


Рис. Д_1.3.10. Напряжения и токи (кривые 1;2) в начале полуволновой линии ($l = 0.488$) с идеальной емкостью на конце ($C_S = 1$) при $R = G = 0$ (a); $R = 5G = 0.48$ (b). Прямая 3 – амплитуда тока, рассчитанная с использованием символического метода.

4. РаPuRи – алгоритм в прямом и обратном времени

Разностные соотношения для расчета волн потенциала и тока в обратном времени строятся как

$$(L - \tau\alpha)_{n-1/2} \frac{-i^{n-1/2} + i_{n-1/2}}{\tau} + \frac{u^n - u^{n-1}}{h_{n-1/2}} + (Ri)_{n-1/2} = 0 ;$$

$$(C - \tau\beta)_{n-1/2} \frac{-u^{n-1/2} + u_{n-1/2}}{\tau} + \frac{i^n - i^{n-1}}{h_{n-1/2}} + (Gu)_{n-1/2} = 0 ,$$
(4.2)

где значения вспомогательных функций в целочисленных узлах по-прежнему определяются из соотношений на характеристиках, но для обратного времени:

$$i^n = \frac{-u_{n-1/2} + u_{n+1/2} + (iZ_B)_{n-1/2} + (iZ_B)_{n+1/2}}{Z_{Bn-1/2} + Z_{Bn+1/2}} ;$$

$$u^n = \frac{-i_{n-1/2} + i_{n+1/2} + (u/Z_B)_{n-1/2} + (u/Z_B)_{n+1/2}}{1/Z_{Bn-1/2} + 1/Z_{Bn+1/2}} .$$

На первый взгляд все выглядит достаточно просто, подозрительно просто. Попробуйте проделать нечто подобное с другой расчетной схемой и повторить прилагаемое видео продолжительностью 16 секунд, после чего станет ясно, что все действительно просто, но совсем не так, как ранее представлялось: <https://cloud.mail.ru/public/GrGS/1aGxzeAFu> .

Домашнее задание

Ниже приводится ЭВМ - программа, создающая рекламный ролик для **BC "Mobiasbanca - Groupe Société Générale" S.A.**

BC "Mobiasbanca - Groupe Société Générale" S.A.

```
clear;
```

```
% первичные параметры линии и расчетной сетки:
```

```
n=2000; nn=n+1; h=2/n; tau=h; k=1000; RS=0;
for i=1:n
X(i)=i*h-h/2; R(i)=0; G(i)=0; D(i)=0; U(i)=0; end;
G(1:1000)=5; G(1500:2000)=5;

for i=1:n
al(i)=(R(i)+G(i))/2;
AD(i)=1+tau*al(i);
ADl(i)=1+tau*(al(i)-R(i));
AUl(i)=1+tau*(al(i)-G(i)); end;
```

```
% начальные токи и напряжения:
```

```
for i=1701:1750
D(i)=(i-1700)*3/50; end;
for i=1851:1900
D(i)=3-(i-1850)*3/50; end;
for i=1751:1800
D(i)=8+(i-1750)*2/50; end;
for i=1801:1850
D(i)=10-(i-1800)*2/50; end;
for i=1601:2000
U(i)=-D(i); end;
for i=101:150
D(i)=(i-100)*3/50; end;
for i=251:300
D(i)=3-(i-250)*3/50; end;
for i=151:200
D(i)=8+(i-150)*2/50; end;
for i=201:250
D(i)=10-(i-200)*2/50; end;
for i=1:400
U(i)=-D(i); end;
```

```
U(501:2:1499)=4;
U(650:2:1350)=0.2;
```

```

for i=501:1499
    D(i)=-U(i); end;
plot(X,D,'k',X,U,'r'); pause(5);

```

% РАСЧЕТ В ПРЯМОМ ВРЕМЕНИ:

```

for j=1:k
    for i=2:n
        DA(i)=(D(i-1)+D(i)+U(i-1)-U(i))/2;
        UA(i)=(U(i-1)+U(i)+D(i-1)-D(i))/2; end;

```

% u = 0 при x = 0:

```

UA(1)=0; DA(1)=D(1)-U(1);

```

% u = Rs · i при x = 2:

```

DA(nn)=(D(n)+U(n))/(1+RS); UA(nn)=RS*DA(nn);

```

```

for i=1:n
    D(i)=(UA(i)-UA(i+1)+D(i)*AD1(i))/AD(i);
    U(i)=(DA(i)-DA(i+1)+U(i)*AU1(i))/AD(i); end;

```

```

if(rem(j,2)==0)
    plot(X,D,'k',X,U,'r'); pause(0.001);end;
end;
plot(X,D,'k',X,U,'r'); pause(5);

```

% РАСЧЕТ В ОБРАТНОМ ВРЕМЕНИ:

```

tau= -tau;
for i=1:n
    al(i)=(R(i)+G(i))/2;
    AD(i)=1+tau*al(i);
    AD1(i)=1+tau*(al(i)-R(i));
    AU1(i)=1+tau*(al(i)-G(i)); end;
for j=1:k
    for i=2:n
        DA(i)=(D(i-1)+D(i)-U(i-1)+U(i))/2;
        UA(i)=(U(i-1)+U(i)-D(i-1)+D(i))/2; end;

```

% u = 0 при x = 0; 2:

```

UA(1)=0; DA(1)=D(1)+U(1);

```

```

UA(nn)=0; DA(nn)=D(n)-U(n);

for i=1:n
D(i)=(UA(i)-UA(i+1)+tau/h*D(i)*AD1(i))/AD(i);
U(i)=(DA(i)-DA(i+1)+tau/h*U(i)*AU1(i))/AD(i);end;
if(rem(j,2)==0)
plot(X,D,'k',X,U,'r'); pause(0.001); end;
end;

```

**% Продолжительность видеопказа в среде Matlab -2 мин;
в среде avi - 16 секунд!**

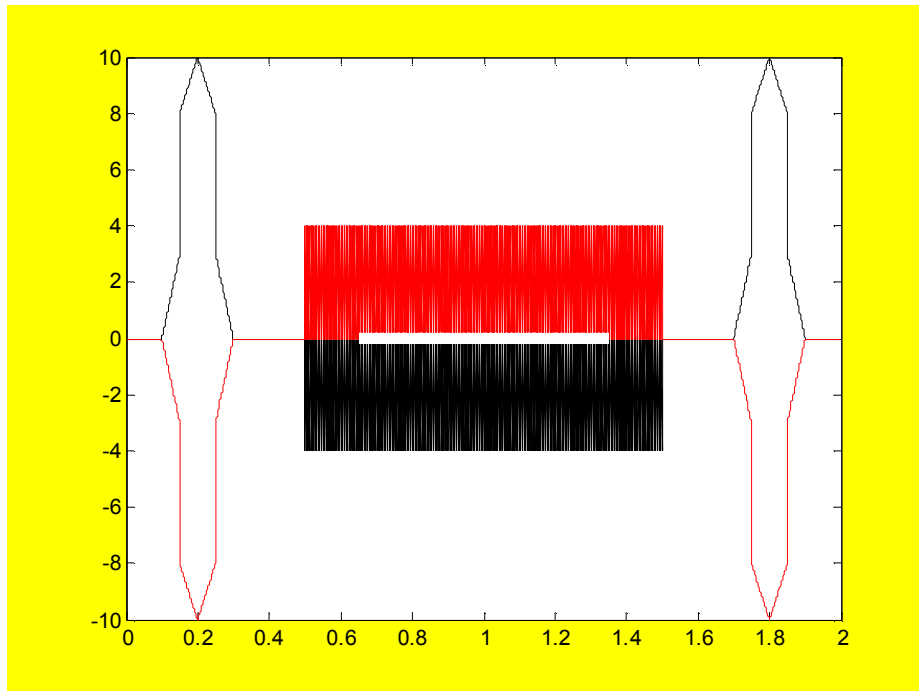


Рис. 33.12. MOBIASBANCA – самый надежный банк в мире. Никакие потрясения ему не страшны. С ним нам подвластны и прошлое, и настоящее, и будущее.

Здесь же мы зашифровали формулу черной ртути от Кадырова Р.А. Делайте как мы, делайте лучше нас! Предлагаем повторить показанное видео любым другим отличным от **PaPuRi** – алгоритма методом или

теми же средствами создать более «крутой» рекламный ролик с использованием логотипа **MOBIASBANCA**.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3: СШИБКА МАСШТАБОВ – 125 ПОРЯДКОВ!

```
clear;
```

```
% первичные параметры линии и расчетной сетки:
```

```
n=2000; nn=n+1; h=2/n; tau=h; k=1000; RS=0;  
for i=1:n  
X(i)=i*h-h/2; R(i)=0; G(i)=0; D(i)=0; U(i)=0; end;  
R(1:n)=250; G(1:n)=250;  
for i=1:n  
al(i)=(R(i)+G(i))/2;  
AD(i)=1+tau*al(i);  
ADl(i)=1+tau*(al(i)-R(i));  
AUl(i)=1+tau*(al(i)-G(i)); end;
```

```
% начальные токи и напряжения:
```

```
U(100:2:900)=1/200;  
U(351:2:651)=1/250;  
U(1000:2:1900)=1/199.99;  
U(1001:2:1901)=1/250;  
U(1311:2:1561)=0;  
plot(X,D,'r',X,U,'k'); grid; pause(5);
```

```
% РАСЧЕТ В ПРЯМОМ ВРЕМЕНИ:
```

```
for j=1:k  
for i=2:n  
DA(i)=(D(i-1)+D(i)+U(i-1)-U(i))/2;  
UA(i)=(U(i-1)+U(i)+D(i-1)-D(i))/2; end;
```

```
% u = 0 при x = 0:
```

```
UA(1)=0; DA(1)=D(1)-U(1);
```

```
% u = Rs·i при x = 2:
```

```
DA(nn)=(D(n)+U(n))/(1+RS); UA(nn)=RS*DA(nn);
```



```

for i=1:n
    D(i)=(UA(i)-UA(i+1)+D(i)*AD1(i))/AD(i);
    U(i)=(DA(i)-DA(i+1)+U(i)*AU1(i))/AD(i); end;

if(rem(j,2)==0)
    plot(X,D,'r',X,U,'k'); grid; pause(0.001);end;
end;
plot(X,D,'r',X,U,'k'); grid; pause(5);

```

% РАСЧЕТ В ОБРАТНОМ ВРЕМЕНИ:

```

tau= -tau;
for i=1:n
    al(i)=(R(i)+G(i))/2;
    AD(i)=1+tau*al(i);
    AD1(i)=1+tau*(al(i)-R(i));
    AU1(i)=1+tau*(al(i)-G(i)); end;
for j=1:k
    for i=2:n
        DA(i)=(D(i-1)+D(i)-U(i-1)+U(i))/2;
        UA(i)=(U(i-1)+U(i)-D(i-1)+D(i))/2; end;

```

% u = 0 при x = 0; 2:

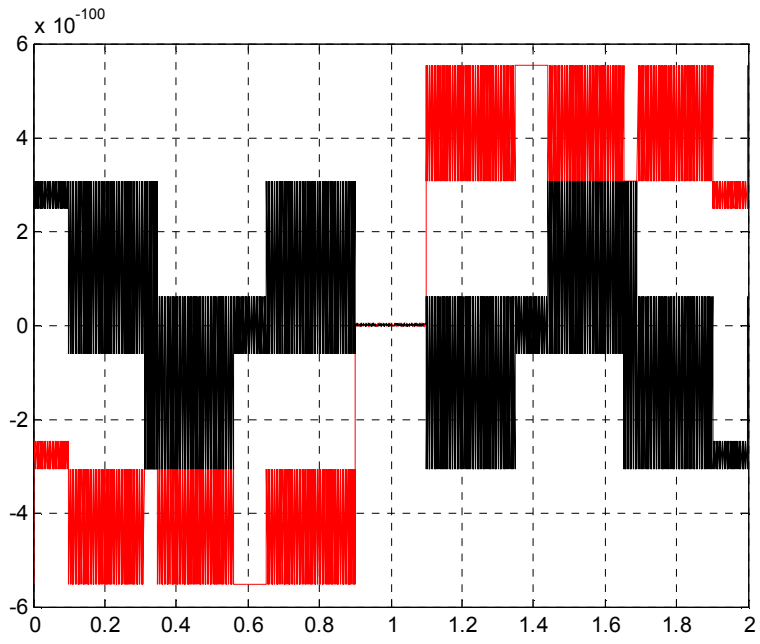
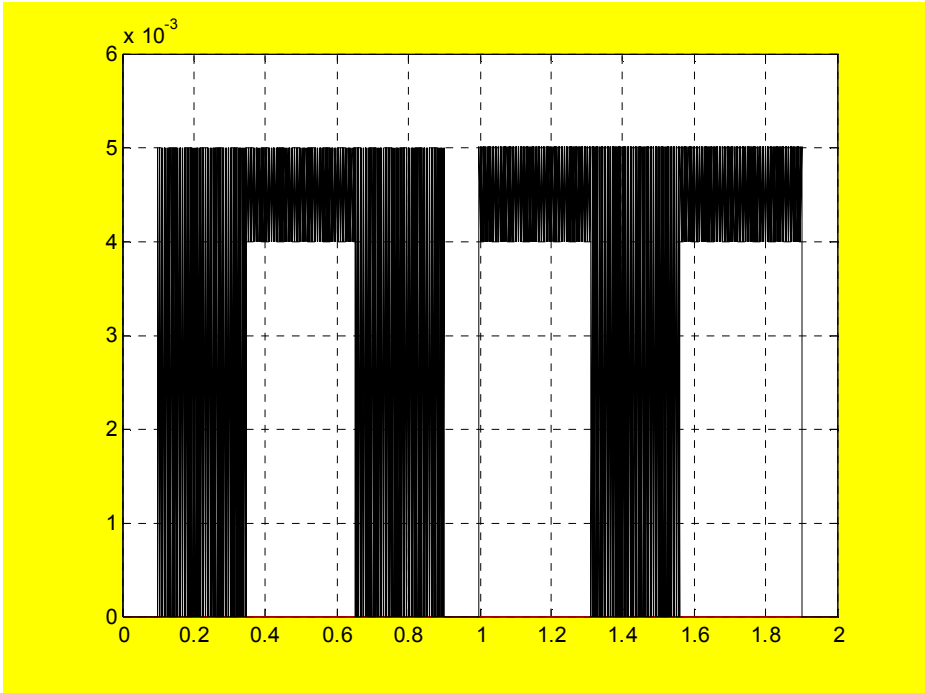
```

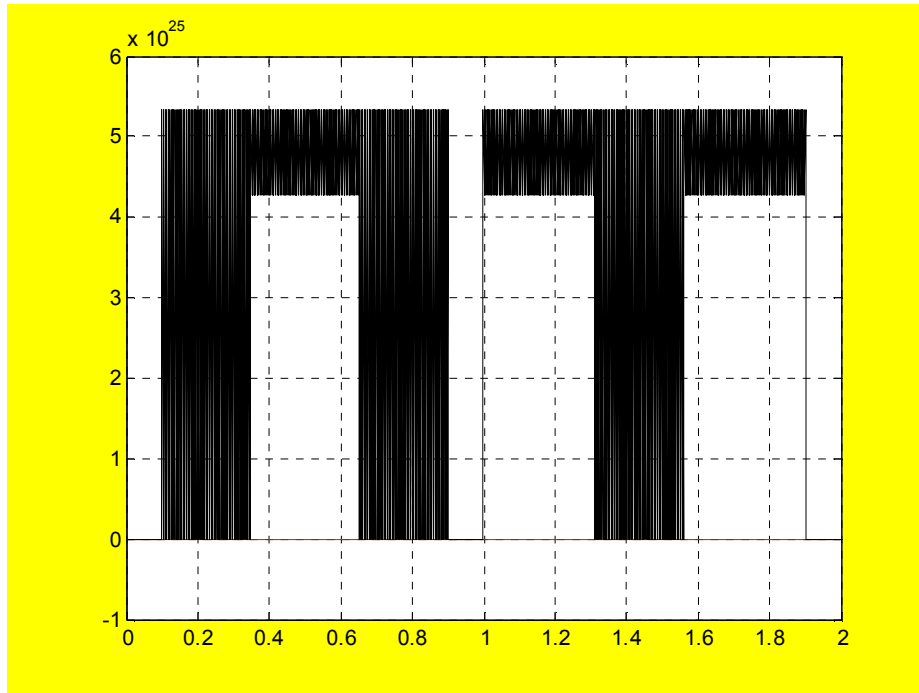
UA(1)=0; DA(1)=D(1)+U(1);
UA(nn)=0; DA(nn)=D(n)-U(n);

for i=1:n
    D(i)=(UA(i)-UA(i+1)+tau/h*D(i)*AD1(i))/AD(i);
    U(i)=(DA(i)-DA(i+1)+tau/h*U(i)*AU1(i))/AD(i);end;
if(rem(j,2)==0)
    plot(X,D,'r',X,U,'k'); grid; pause(0.001); end;
end;

```

% Продолжительность видеопказа - 2 минуты





Статья № 3: Волновое сопротивление и согласованная нагрузка для многопроводной ЛЭП

25. Взаимовлияние проводов на распределение напряжений и мощности в трехфазной линии

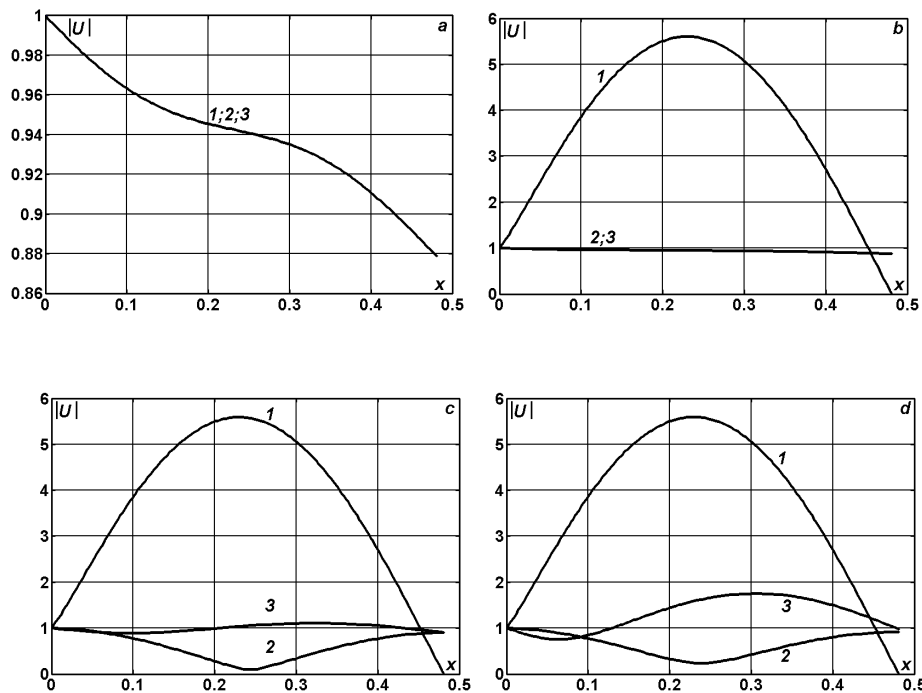
Уравнения трехфазной линии (рис. 25.1) внешне не отличаются от формы уравнений представленных в скалярном виде, когда используется однопроводное представление дальней электропередачи

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0, \quad C \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0, \quad x \in (0, l), \quad t > 0. \quad (25.1)$$

На рис. 25.2–25.7 представлены результаты расчетов для исходных данных, представленных в безразмерном виде

$$U_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ e^{-2j\pi/3} \\ e^{-4j\pi/3} \end{pmatrix}, C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, C_2 = \begin{pmatrix} 1 & -0.18 & -0.04 \\ -0.18 & 1.03 & -0.18 \\ -0.04 & -0.18 & 1 \end{pmatrix},$$

$$C_3 = \begin{pmatrix} 1 & -0.18 & -0.18 \\ -0.18 & 1 & -0.18 \\ -0.18 & -0.18 & 1 \end{pmatrix}, L = C^{-1}/a^2, R = 0.48, G = R/7.$$



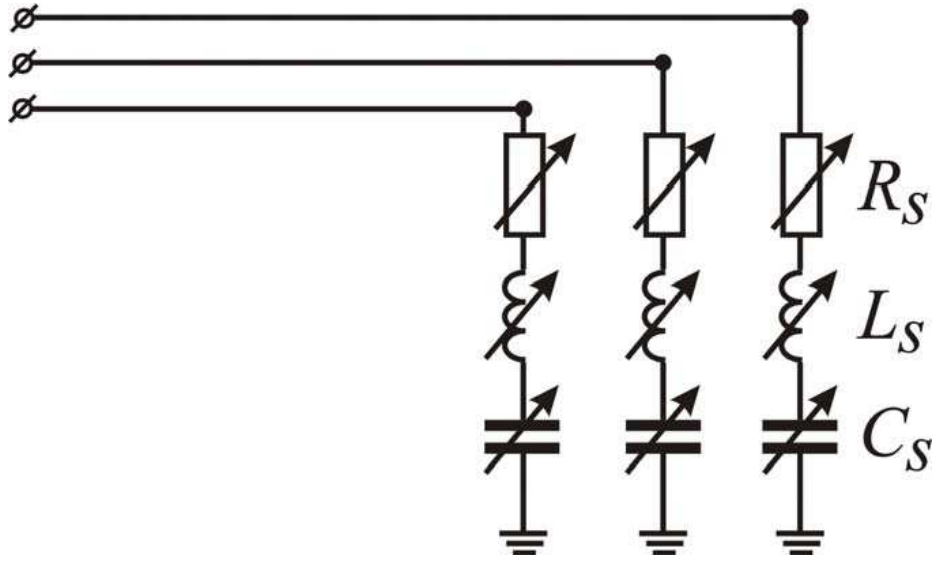
Даже столь поверхностный анализ результатов тестовых расчетов позволяет сделать следующие предварительные выводы. Математические модели многопроводных линий таят в себе много неизведанной информации и парадоксальных на первый взгляд фактов. Их количество будет только возрастать по мере естественного усложнения модели как

то: переход к многоскоростной теории распространения электромагнитных волн, включение в линию устройств с сосредоточенными элементами, учет неоднородностей в виде точек ветвления и т.д. Все это потребует проведения дальнейших исследований и целенаправленных вычислительных экспериментов.

Домашнее задание

В параграфе 1 мы уже писали, что замена трехфазной линии однопроводной моделью является достаточно грубым приближением. Ни в одном учебнике или Википедии нет ответа на, казалось бы, очень простой вопрос: что же такое согласованная нагрузка для трехфазной линии, когда в ней есть взаимовлияние проводов? Варианты ответов:

1. Согласованную нагрузку можно представить в виде одного комплексного числа, как в случае с одним проводом.
2. Ее можно представить в виде трех чисел, как в случае, когда между проводами нет взаимовлияния, т.е. когда матрицы взаимных индуктивностей L и емкостей C диагональные.
3. Ее можно представить только в виде 9 чисел, заполняющих матрицу 3×3 : $Z = L^{1/2} C^{-1/2}$.



???