

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра теоретической и общей электротехники

Л.В. БЫКОВСКАЯ, В.В. БЫКОВСКИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
государственного образовательного учреждения высшего профессионального
образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2009

УДК 621.3.011.7(076.5)

ББК 31.211я73

Б 95

Рецензент

кандидат технических наук, доцент С.Н.Бравичев

Быковская Л.В.
Б 95 **Электрические цепи с распределёнными параметрами: методические указания для расчетно-графической работы/ Л.В.Быковская, В.В.Быковский. - Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2009. - 31 с.**

Методические указания содержат исходные данные, краткие теоретические положения и пример выполнения расчетно-графической работы, включающей задачи по разделу курса ТОЭ - электрические цепи с распределёнными параметрами.

Для студентов электроэнергетического факультета.

ББК 31.211я73

© Быковская Л.В., 2009

© Быковский В.В., 2009

© ГОУ ВПО ОГУ, 2009

Содержание

Введение	4
1 Методические указания к выполнению расчетно-графической работы	5
2 Задача 1	7
3 Задача 2	7
4 Порядок выполнения задачи 1 РГЗ №7.....	9
5 Порядок выполнения задачи 2 РГЗ №7.....	12
6 Пример решения задачи 2 РГЗ №7	13
Список использованных источников	20
Приложение А	21

Введение

Методические указания предназначены для выполнения расчетно-графической работы (РГР) по теоретическим основам электротехники студентами электроэнергетического факультета работы, которая включает типовые задачи по разделу курса ТОЭ – «Электрические цепи с распределёнными параметрами» согласно расчетно-графическому заданию (РГЗ) №7 рабочей программы, составленной на основе ГОС для специальности 140211 – Электроснабжение.

Работа состоит из двух частей. В первой части, согласно заданию, требуется выполнить расчёт установившихся режимов цепи с распределёнными параметрами, представленной длинной линией. Во второй части требуется провести расчёт переходного процесса возникающего при подключении нагруженной линии к идеальному источнику постоянной ЭДС. Варианты задания отличаются друг от друга числовыми значениями параметров и топологией схемы нагрузки.

1 Методические указания к выполнению расчетно-графической работы

К представляемой на защиту расчетно-графической работе предъявляются следующие требования:

1) пояснительная записка выполняется на листах формата А4 с обязательной нумерацией страниц и в соответствии с требованиями СТП 101-00;

2) основные этапы решения типовых задач должны быть достаточно подробно пояснены;

3) рисунки, графики, схемы, в том числе и заданные условием задачи, должны быть выполнены аккуратно и в удобочитаемом масштабе с указанием обозначений;

4) вычисления должны быть сделаны с точностью не ниже, чем четыре значащие цифры;

5) расчетно-графическая работа должна быть датирована и подписана студентом;

Выполненная расчетно-графическая работа будет зачтена, если решения не содержат ошибок принципиального характера и если выполнены перечисленные требования.

Работа над расчетно-графическим заданием помогает студентам проверить степень усвоения им курса, вырабатывает у них навык четко и кратко излагать свои мысли. Для успешного достижения этой цели необходимо руководствоваться следующими правилами:

1) начиная решение задачи, указать, какие физические законы или расчетные методы предполагается использовать при решении, привести математическую запись этих законов и методов;

2) тщательно продумать, какие буквенные символы для обозначения физических величин предполагается использовать в решении. Пояснить значение каждого буквенного символа словами или же соответствующим обозначением на схеме;

3) в ходе решения задачи не следует изменять принятые направления токов и наименование узлов, элементов цепи и т.п. При решении одной и той же задачи различными методами одну и ту же величину надлежит обозначать одним и тем же буквенным символом. Для элементов электрических схем следует пользоваться обозначениями, применяемыми в учебниках по электротехнике;

4) каждому этапу решения задачи нужно давать пояснения;

5) расчет каждой искомой величины следует выполнить сначала в общем виде, а затем в полученную формулу подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единицы измерения. При решении систем уравнений и построении графиков целесообразно воспользоваться компьютером, в частности пакетом MathCAD, предназначенным для выполнения математических вычислений;

6) решение задач не следует перегружать приведением всех алгебраи-

ческих преобразований и арифметических расчетов;

7) промежуточные и конечные результаты расчетов должны быть ясно выделены из общего текста;

8) при построении кривых выбирать такой масштаб, чтобы на 1 см оси координат приходилось $1 \cdot 10^{\pm n}$ или $2 \cdot 10^{\pm n}$ единиц измерения физической величины, где n – целое число. Градуировку осей выполнять, начиная с нуля, равномерно через один или два параметра. Числовые значения координат точек, по которым строятся кривые, не приводить. Весь график в целом и отдельные кривые на нем должны иметь названия.

2 Задача 1

В начале линии с распределенными параметрами без потерь, имеющей длину l и волновое сопротивление Z_C , приложено синусоидальное напряжение U_1 .

Определить циклическую частоту f , при которой длина волны $\lambda = 3 \cdot l/4$. Округлить найденное значение циклической частоты до ближайшего целого числа сотен герц и на пяти графиках построить кривые распределения вдоль линии действующих значений напряжения и тока $U(y)$, $I(y)$ в установившемся режиме при холостом ходе, коротком замыкании, согласованном режиме при сопротивлениях нагрузки $Z_2 = 0,5Z_C$ и $Z_2 = 2Z_C$.

Фазовую скорость волны принять равной скорости света ($v_\phi = c$).

Примечание: вариант задается тремя цифрами: первая – номер столбца в таблице 1.1, вторая – номер столбца в таблице 1.2, третья – номер столбца в таблице 1.3.

Таблица 1.1 – Значения длины линии

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l , км	100	200	400	500	300	350	550	450	250	150

Таблица 1.2 – Значения напряжения в начале линии

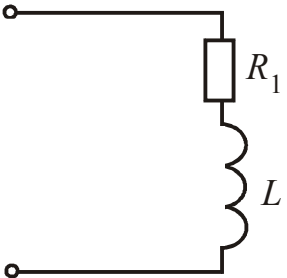
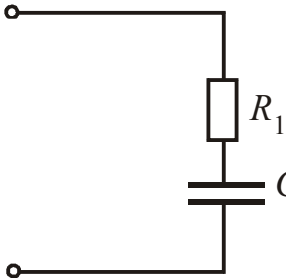
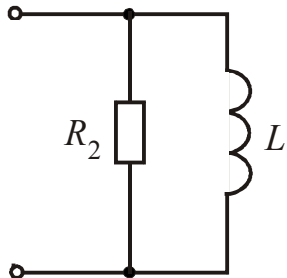
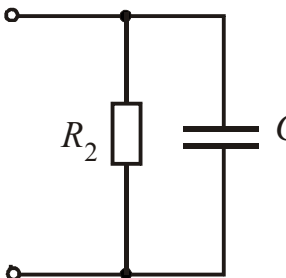
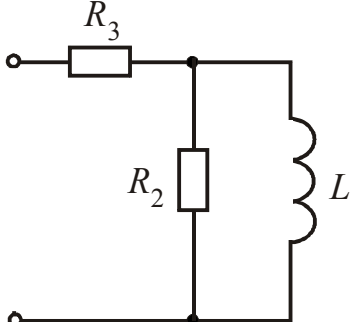
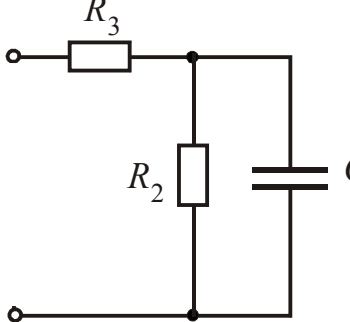
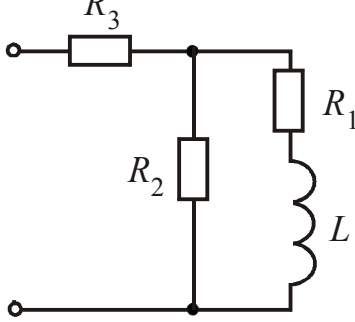
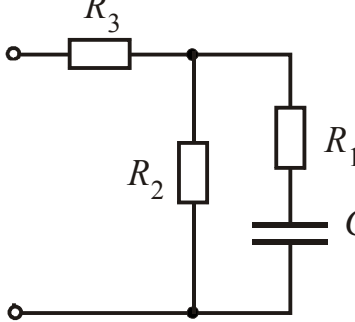
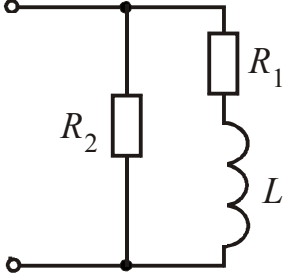
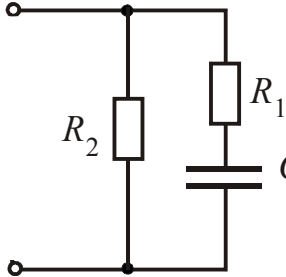
№	1	2	3
U_1 , кВ	100	200	300

Таблица 1.3 – Значения волнового сопротивления

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Z_C , Ом	100	200	400	500	300	350	550	450	250	150

3 Задача 2

Рассматриваемая в первой задаче линия без потерь подключается к идеальному источнику постоянного напряжения с ЭДС E . В конце линии включен приемник, обладающий индуктивностью или емкостью. Рассчитать ток и напряжение падающей и отраженной волн. Построить графики распространения падающей волны, суммарных волн напряжения и тока в линии для момента времени, когда отраженная волна пройдет половину длины линии. Фазовую скорость волны считать равной скорости света.

0		1	
2		3	
4		5	
6		7	
8		9	

ПРИМЕЧАНИЕ:

Вариант задается тремя цифрами: первая – номер схемы приемника, вторая – номер столбца в таблице 1.4, третья – номер столбца в таблице 1.5.

Таблица 1.4 – Значения ЭДС источника

№	1	2	3
E , кВ	100	200	300

Таблица 1.5 – Параметры схем приемников

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_1 , Ом	50	20	110	130	90	100	140	120	80	60
R_2 , Ом	200	400	800	1000	600	700	1100	900	500	300
R_3 , Ом	100	200	400	500	300	350	550	450	250	150
L , мГн	10	20	40	50	30	35	55	45	25	15
C , мкФ	1,0	0,8	0,4	0,25	0,60	0,5	0,2	0,3	0,7	0,9

4 Порядок выполнения задачи 1 РГЗ №7

4.1 Вычисление циклической частоты производится по формуле:

$$f = \frac{v_\phi}{\lambda},$$

где $v_\phi = c = 3 \cdot 10^5$ км/с - фазовая скорость волны;

$$\lambda - \text{длина волны, } \lambda = \frac{3 \cdot l}{4}.$$

После округления циклической частоты до целого числа сотен герц находится уточненное значение длины волны по формуле:

$$\lambda = \frac{v_\phi}{f}.$$

4.2 При определении зависимостей $U(y)$ и $I(y)$ в различных режимах необходимо использовать основные уравнения для линии без потерь:

$$U(y) = U_2 \cos(\beta \cdot y) + jI_2 \cdot Z_c \sin(\beta \cdot y), \quad (1)$$

$$I(y) = \left(\frac{jU_2}{Z_c} \right) \sin(\beta \cdot y) + I_2 \cos(\beta \cdot y), \quad (2)$$

$$\text{где } \beta = \frac{2\pi}{\lambda};$$

y - координата точек линии с началом отсчета в конце линии;

U_2, I_2 – напряжение и ток в конце линии.

Для режима холостого хода $\mathcal{E}_2 = 0$ уравнения (1) и (2) запишутся для действующих значений U и I в виде:

$$U(y) = U_2 |\cos \beta y|, \quad (3)$$

$$I(y) = (\mathcal{E}_2 / Z_c) |\sin \beta y|. \quad (4)$$

Так как задано действующее значение напряжения в начале линии U_1 , то действующее значение U_2 можно найти из уравнения (3), полагая $y = l$:

$$U_2 = \frac{U_1}{|\cos(\beta \cdot l)|}.$$

4.3 При расчете зависимостей $U(y)$, $I(y)$ по (3) и (4), целесообразно задаваться значениями: $y = 0$; $y = \frac{\lambda}{20}$; $y = \frac{2\lambda}{20} = \frac{\lambda}{10}$; ...; $y = \frac{\lambda}{4}$. В этом случае величина $(\beta \cdot y)$ находится просто. Например:

$$y = \frac{\lambda}{8}; \beta y = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{8} = \frac{\pi}{4} \text{ и т.д.}$$

Так как в линии без потерь затухания нет, то по вычисленным значениям напряжения и тока на основании симметрии можно построить кривые распределения напряжения и тока для всей длины линии.

4.4 Для режима короткого замыкания равно нулю напряжение в конце линии, $\mathcal{E}_2 = 0$. Тогда из (1) и (2), действующие значения напряжения и тока определяются по формуле:

$$U(y) = I_2 \cdot Z_c |\sin(\beta \cdot y)|, \quad (5)$$

$$I(y) = I_2 |\cos(\beta \cdot y)|, \quad (6)$$

где значение тока в конце линии определяем из (5), полагая $y = l$:

$$I_2 = \frac{U_1}{Z_c |\sin(\beta \cdot l)|}.$$

Распределение напряжения и тока вдоль линии $U(y)$ и $I(y)$ по уравнениям (5), (6) аналогично пункту 4.3.

4.5 В согласованном режиме уравнения (1) и (2) можно переписать следующим образом:

$$U(y) = U_2 |\cos(\beta \cdot y) + j \sin(\beta \cdot y)|,$$

$$I(y) = I_2 |j \sin(\beta \cdot y) + \cos(\beta \cdot y)|.$$

Так как модуль числа $|\cos(\beta \cdot y) + j \sin(\beta \cdot y)|$ равен 1 при любых значениях $(\beta \cdot y)$, то действующие значения U и I :

$$U(y) = U_2 = U_1,$$

$$I(y) = I_2 = \frac{U_2}{Z_c},$$

т.е. при согласованном режиме действующее значение напряжения и тока вдоль линии постоянны и не зависит от координаты y , что свидетельствует об отсутствии отраженных волн.

4.6 При нагрузочном режиме в случае $Z_2 = 0,5Z_c$ уравнения (1) и (2) запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{U}(y) &= \dot{U}_2 (\cos \beta y + j2 \sin \beta y), \\ \dot{I}(y) &= \dot{I}_2 (j0,5 \sin \beta y + \cos \beta y) \end{aligned}$$

или для действующих значений напряжения и тока:

$$U(y) = U_2 |\cos \beta y + j2 \sin \beta y|, \quad (7)$$

$$I(y) = I_2 |\cos \beta y + j0,5 \sin \beta y|, \quad (8)$$

где U_2 находится по заданному значению U_1 ,

$$U_2 = \frac{U_1}{|\cos(\beta \cdot l) + j2 \sin(\beta \cdot l)|}, \text{ а } I_2 = \frac{U_2}{Z_2}.$$

Задавая значениями $y = 0; y = \frac{\lambda}{20}; y = \frac{2\lambda}{20}; \dots; y = \frac{\lambda}{4}$, по уравнениям (7) рассчитываем зависимости $U(y)$ и $I(y)$.

4.7 Методика расчета рабочего режима в случае, когда $Z_2 = 2Z_c$ подобна предыдущему случаю. По рассчитанным зависимостям $U(y)$ и $I(y)$ необходимо построить соответствующие графики.

4.8 При оформлении первой задачи для защиты РГЗ необходимо привести исходные данные, расчет циклической частоты и уточненного значения длины волны, расчеты напряжения и тока в исследуемых режимах, которые целесообразно свести в таблицы, и графики распределения напряжения и тока от конца до начала линии для каждого режима.

5 Порядок выполнения задачи 2 РГЗ №7

5.1 Определяются напряжение и ток падающей волны. Напряжение падающей волны равно ЭДС источника напряжения:

$$u_{пад} = E,$$

а ток падающей волны определяется по формуле:

$$i_{пад} = \frac{u_{пад}}{Z_c},$$

где Z_c - заданное волновое сопротивление.

5.2 Рассчитывается переходный процесс в схеме приемника, который возникает в момент достижения падающей волной конца линии.

Составляется расчетная схема, рисунок 1, и любым методом расчёта переходного процесса определяются напряжение $u_{наг}(t)$ и ток $i_{наг}(t)$ приемника (нагрузки). При расчете переходного процесса время отсчета начинают от момента достижения падающей волной конца линии.

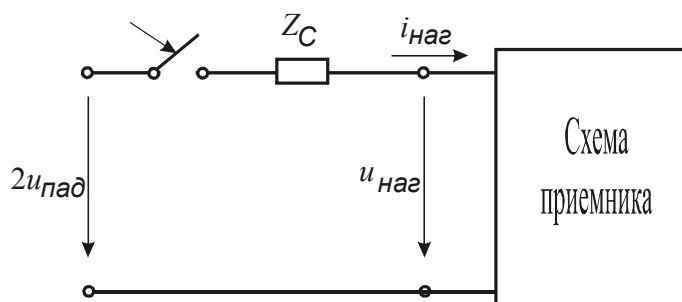


Рисунок 1

5.3 Определяются напряжение и ток отраженной волны в конце линии, как функции времени $u_{отр}(t)$, $i_{отр}(t)$ по формулам:

$$u_{отр}(t) = u_{нагр}(t) - u_{пад},$$

$$i_{отр}(t) = i_{пад} - i_{нагр}(t).$$

Правильность расчета переходного процесса и вычисления напряжения и тока отраженной волны в конце линии можно проверить с помощью закона Ома для отраженной волны:

$$i_{отр}(t) = \frac{u_{отр}(t)}{Z_c}$$

5.4 С помощью найденных функций $u_{отр}(t)$, $i_{отр}(t)$ строятся кривые изменения во времени напряжения и тока отраженной волны в конце линии. Построение этих кривых целесообразно производить, начиная с $t = 0$ по точ-

кам через интервал времени $t = \tau$, где τ - постоянная времени экспонент переходных напряжения и тока приемника.

5.5 По кривым $u_{omp}(t)$ и $i_{omp}(t)$ строятся графики распределения вдоль линии напряжения и тока падающей и отраженной волн для момента времени $t_1 = l/2v$, а также кривые суммарных напряжения и тока линии. При этом время t_1 отсчитывается от момента достижения падающей волной конца линии.

5.6 При оформлении второй задачи для защиты РГЗ необходимо привести исходную схему и ее параметры, схему для расчета переходного процесса в цепи приемника и расчет переходного процесса, а также (при $t = t_1$):

- кривые изменения во времени напряжения и тока отраженной волны в конце линии;
- графики распределения вдоль линии напряжения и тока падающей и отраженной волн;
- суммарные кривые распределения напряжений и тока линии.

6 Пример решения задачи №2 РГЗ №7

Дано:

$$E = 300 \text{ кВ}$$

$$Z_C = 500 \text{ Ом}$$

$$l = 500 \text{ км}$$

$$C = 0,25 \text{ мкФ}$$

$$R_2 = 1000 \text{ Ом}$$

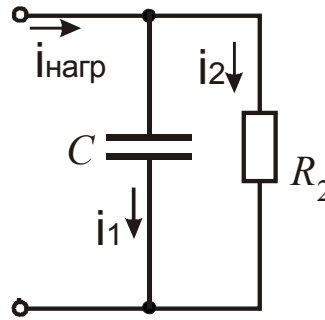
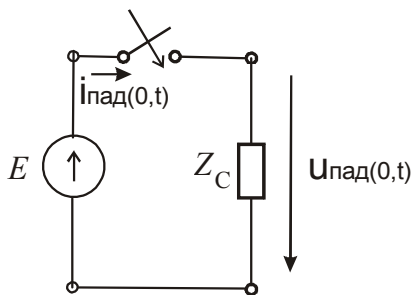


Рисунок 2 – Исходная схема

1) Расчёт падающих волн



$$u_{пад}(x,t) = \begin{cases} 300 \cdot 10^3 \text{ при } x \leq V \cdot t \\ 0 \text{ при } x > V \cdot t \end{cases}$$

$$i_{пад}(0,t) = \frac{u_{пад}(0,t)}{Z_C} = \frac{300 \cdot 10^3}{500} = 0,6 \cdot 10^3 \text{ А}$$

$$u_{пад}(x,t) = \begin{cases} 0,6 \cdot 10^3 \text{ при } x \leq V \cdot t \\ 0 \text{ при } x > V \cdot t \end{cases}$$

Рисунок 3 - Схема замещения

2) Расчёт отраженных волн

При достижении падающей волны конца линии в приемнике возникает переходной процесс, если определим переходной процесс, то можно рассчитать отраженные волны напряжения и тока. Для расчёта переходного процесса составим эквивалентную схему (рисунок 4) и определим переходные ток и напряжение на нагрузке операторным методом.

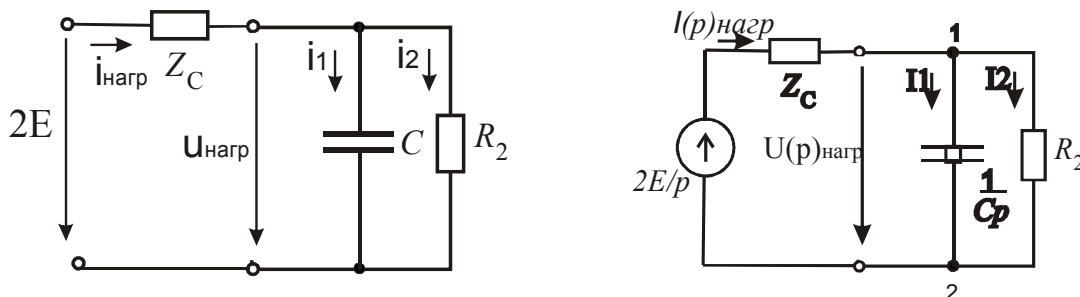


Рисунок 4 – Эквивалентная и операторная схемы замещения

Операторное изображение напряжения между двумя узлами:

$$U_{12}(p) = \frac{\frac{2 \cdot E_{над}}{p} \cdot \frac{1}{Z_C}}{\frac{1}{Z_C} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{1/C \cdot p}} = \frac{\frac{2 \cdot E_{над}}{p \cdot Z_C}}{\frac{1}{Z_C} + \frac{1}{R_2} + C \cdot p} = \frac{2 \cdot E_{над} \cdot Z_C \cdot R_2}{p \cdot Z_C \cdot (R_2 + Z_C + Z_C \cdot C \cdot R_2 \cdot p)} = \frac{2 \cdot E_{над} \cdot R_2}{p \cdot (R_2 + Z_C + Z_C \cdot C \cdot R_2 \cdot p)} = \frac{F_1}{F_2}.$$

Перейдём от изображения к оригиналу, используя теорему разложения.

$$F_2(p) = 0$$

$$p \cdot (R_2 + Z_C + Z_C \cdot C \cdot R_2 \cdot p) = 0$$

$$R_2 + Z_C + Z_C \cdot C \cdot R_2 \cdot p_2 = 0$$

$$p_1 = 0 \quad 1000 + 500 + 500 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot p_2 = 0$$

$$p_2 = -12000$$

Так как корни вещественные, то используем выражение:

$$u_{нагр}(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} \cdot e^{p_k \cdot t} = \frac{F_1(0)}{F_2'(0)} + \frac{F_1(p_2)}{F_2'(p_2)} \cdot e^{p_2 t},$$

$$\text{где } F_1(0) = 2 \cdot E_{над} \cdot R_2 = 600 \cdot 10^6;$$

$$F_1(p_2) = 2 \cdot E_{над} \cdot R_2 = 600 \cdot 10^6;$$

$$F_2'(p) = R_2 + Z_C + 2 \cdot p \cdot C \cdot Z_C \cdot R_2;$$

$$F_2'(0) = 1000 + 500 + 2 \cdot 0 \cdot 0,25 \cdot 10^6 \cdot 500 \cdot 1000 = 1500;$$

$$F_2'(p_2) = 1000 + 500 + 2 \cdot (-12000) \cdot 0,25 \cdot 10^6 \cdot 500 \cdot 1000 = -1500;$$

$$u_{нагр}(t) = \frac{F_1(0)}{F_2'(0)} + \frac{F_1(p_2)}{F_2'(p_2)} \cdot e^{p_2 t} = \frac{600 \cdot 10^6}{1500} + \frac{600 \cdot 10^6}{-1500} \cdot e^{-12000 \cdot t} = 400000 - 400000 \cdot e^{-12000 \cdot t}, B$$

Определим операторное изображение тока в нагрузке по закону Ома.

$$\begin{aligned}
I(p) &= \frac{-U_{12}(p) + \frac{2 \cdot E_{na\partial}}{p}}{Z_C} = \frac{-U_{12}(p) \cdot p + 2 \cdot E_{na\partial}}{p \cdot Z_C} = \\
&= \frac{-\frac{2 \cdot E_{na\partial} \cdot R_2}{p \cdot (R_2 + Z_C + Z_C \cdot C \cdot R_2 \cdot p)} \cdot p + 2 \cdot E_{na\partial}}{p \cdot Z_C} = \\
&= \frac{-2 \cdot E_{na\partial} \cdot R_2 + 2 \cdot E_{na\partial} \cdot (R_2 + Z_C + Z_C \cdot C \cdot R_2 \cdot p)}{(R_2 + Z_C + Z_C \cdot C \cdot R_2 \cdot p) \cdot p \cdot Z_C} = \frac{F_1}{F_2}.
\end{aligned}$$

Перейдём от изображения к оригиналу, используя теорему разложения:

$$F_2(p) = 0;$$

$$F_2(p) = (R_2 + Z_C + Z_C \cdot C \cdot R_2 \cdot p) \cdot p \cdot Z_C = 0;$$

$$R_2 + Z_C + Z_C \cdot C \cdot R_2 \cdot p_2 = 0;$$

$$p_1 = 0; \quad 1000 + 500 + 500 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot p_2 = 0;$$

$$p_2 = -12000;$$

$$F_1(0) = -2 \cdot E_{na\partial} \cdot R_2 + 2 \cdot E_{na\partial} \cdot (R_2 + Z_C + Z_C \cdot C \cdot R_2 \cdot p_1) = 3 \cdot 10^8;$$

$$F_1(p_2) = -2 \cdot E_{na\partial} \cdot R_2 + 2 \cdot E_{na\partial} \cdot (R_2 + Z_C + Z_C \cdot C \cdot R_2 \cdot p_2) = -6 \cdot 10^8;$$

$$F_2'(p) = R_2 \cdot Z_C + Z_C^2 + 2 \cdot p \cdot C \cdot Z_C \cdot R_2;$$

$$\begin{aligned}
F_2'(0) &= R_2 \cdot Z_C + Z_C^2 + 2 \cdot p_1 \cdot C \cdot Z_C \cdot R_2 = \\
&= 1000 \cdot 500 + 500^2 + 2 \cdot 0 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 500 \cdot 1000 = 7,5 \cdot 10^5;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_2'(-12000) &= R_2 \cdot Z_C + Z_C^2 + 2 \cdot p_1 \cdot C \cdot Z_C \cdot R_2 = 1000 \cdot 500 + 500^2 + \\
&+ 2 \cdot 12000 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 500 \cdot 1000 = -7,5 \cdot 10^5;
\end{aligned}$$

$$i_{назр}(t) = \frac{F_1(0)}{F_2'(0)} + \frac{F_1(p_2)}{F_2'(p_2)} \cdot e^{p_2 t} = \frac{3 \cdot 10^8}{7,5 \cdot 10^5} + \frac{-6 \cdot 10^8}{-7,5 \cdot 10^5} \cdot e^{-12000 \cdot t} =$$

$$= 400 + 800 \cdot e^{-12000 \cdot t}, A$$

$$u_{omp}(l, t) = u_{назр}(t) - u_{na\partial}(l, t) = 400000 - 400000 \cdot e^{-12000 \cdot t} - 300000 =$$

$$= 100000 - 400000 \cdot e^{-12000 \cdot t}, B$$

$$i_{omp}(l, t) = i_{nad}(l, t) - i_{назр}(t) = 600 - (400 + 800 \cdot e^{-12000 \cdot t}) = 200 - 800 \cdot e^{-12000 \cdot t}, A$$

Проверка:

$$i_{omp}(l, t) = \frac{u_{omp}(l, t)}{Z_C} = \frac{100000 - 400000 \cdot e^{-12000 \cdot t}}{500} = 200 - 800 \cdot e^{-12000 \cdot t}, A.$$

Результаты равны. Построим графики $u_{omp}(l, t); i_{omp}(l, t)$. Построение будем проводить в четыре этапа.

Сначала построим зависимость $u_{omp}(t) = 100000 - 400000 \cdot e^{-12000 \cdot t}$. Определим значение постоянной времени переходного процесса:

$$\tau = \frac{1}{|p|} = \frac{1}{|-12000|} = 8,333 \cdot 10^{-5}, \text{ с. Результаты расчётов занесём в таблицу 6.}$$

Таблица 6

$t, \text{ с}$	0	τ	$2 \cdot \tau$	$3 \cdot \tau$	$4 \cdot \tau$	$5 \cdot \tau$	$6 \cdot \tau$
$u_{omp}(t)$	-300000	-47150	45870	80090	92670	97300	99010

На рисунке 5 построим зависимость по данным таблицы 6.

Рассчитаем время, когда волны пройдут расстояние, равное половине длине линии

$$t_1 = \frac{l}{2 \cdot V} = 8.333 \cdot 10^{-4}, \text{ с.}$$

Значение отраженной волны напряжения при времени, равном t_1 .

$$u_{omp}(t_1) = 100000 - 400000 e^{-12000 \cdot 8.333 \cdot 10^{-4}} = 99980, \text{ В}$$

Построим графики $u_{omp}(l, t_1); i_{omp}(l, t_1)$, для момента времени, когда волны пройдут расстояние, равное половине длине линии. Данные расчётов занесём в таблицу 7.

$$u_{omp}(y, t_1) = 100000 - 400000 \cdot e^{-12000 \cdot \left(t_1 - \frac{y}{V}\right)}, \text{ В}$$

Где $V = 3 \cdot 10^5$ км/с – скорость света.

Таблица 7

$y, \text{ км}$	0	100	125	200	225	250
$u_{\text{отр}}(y, t_1)$	99980	99010	97300	45870	-47150	-300000

На рисунке 6 построим зависимость по данным таблицы 7. На рисунке 7 построим график падающей волны напряжения, а на рисунке 8 покажем график распределения вдоль линии суммарной волны напряжения.

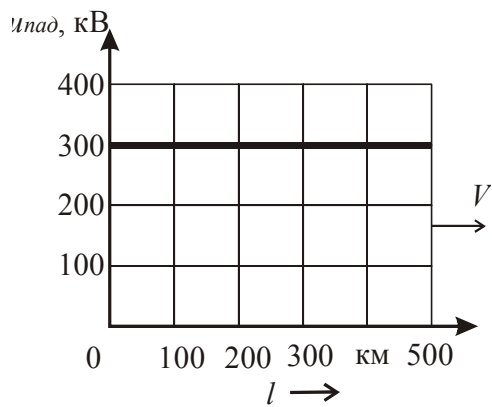


Рисунок 5 – Зависимость $u_{над}(l, t)$

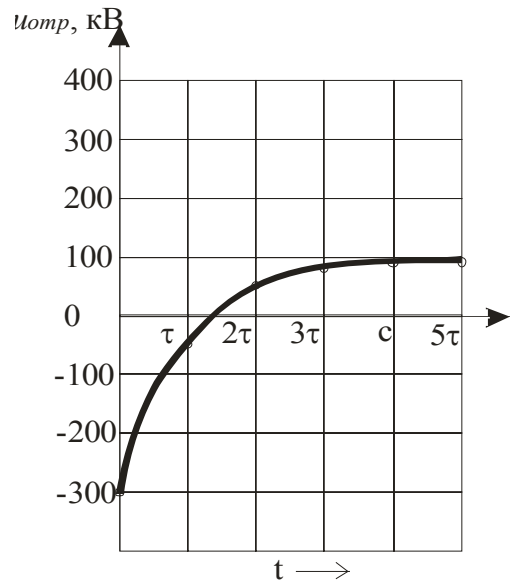


Рисунок 6 – Зависимость $u_{отр}(t)$

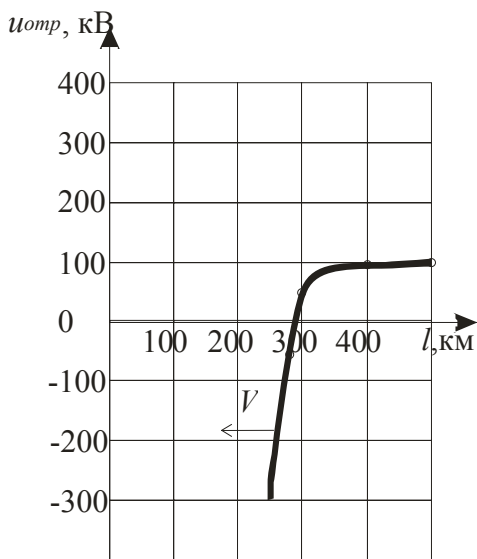


Рисунок 7 – Зависимость $u_{отр}(y, t)$

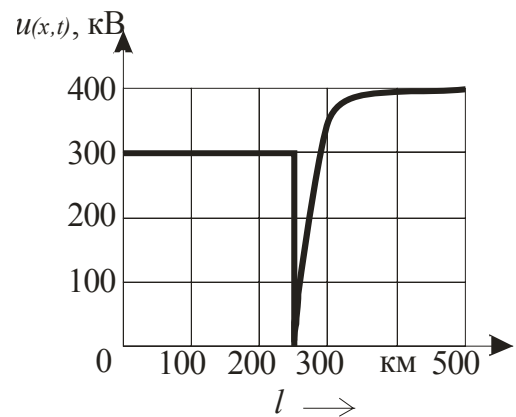


Рисунок 8 – Зависимость $u(x, t)$

Аналогично строятся зависимости для тока в нагрузке.

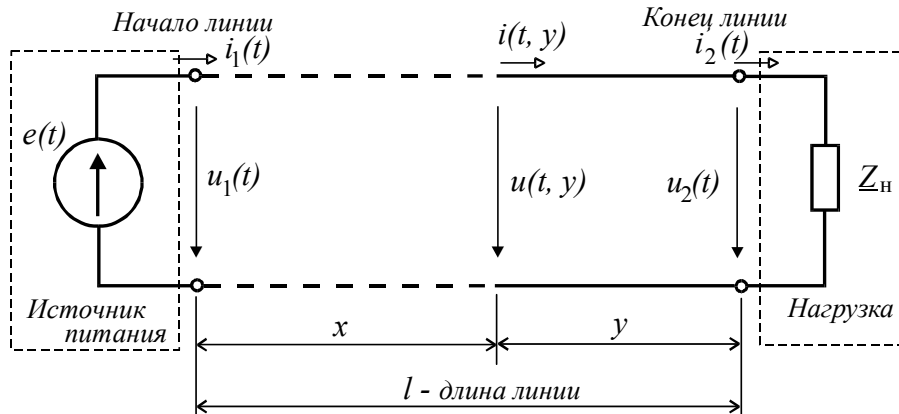
В приложении А приведен пример выполнения РГЗ №7 в системе MathCad, причём задача №2 выполнена классическим методом.

Список использованных источников

- 1 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст]: учебник для вузов/ Л. А Бессонов. -М.: Гардарики., 2007. - 701 с.
- 2 **Демирчян, К. С.** Теоретические основы электротехники: в 3 т.: учебник для вузов/ К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. - СПб.: Питер, 2003.- т.1 - 463 с. ISBN 5-94723-620-6.
- 3 **Зевеке, Г. В.** Основы теории цепей: учебник для вузов/ Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528 с.
- 4 **Татур, Т.А.** Установившиеся и переходные процессы в электрических цепях.: учебное пособие для вузов/ Т.А.Татур, В.Е.Татур. – М.: Высшая школа, 2001.- 407 с.
- 5 **Баранник О.В.** Методические указания к выполнению расчётно-графических заданий по теоретическим основам электротехники № 7, 8, 9/О.В. Баранник, Н.И.Доброжанова, А.В.Желтяков, В.Д.Шевеленко. - Оренбург: ОрПИ, 1982. – 34 с.

Приложение А (рекомендуемое)

Пример выполнения РГЗ №7



Рассмотрим пример выполнения РГЗ №7 в системе Mathcad:

Часть 1

ORIGIN:= 1

Исходные данные:

длина линии

$$L := 490000 \text{ м}$$

действующее значение напряжения

$$U1 := 300000 \text{ В}$$

волновое сопротивление

$$zс := 450 \text{ Ом}$$

РЕШЕНИЕ.

Длина волны

$$\lambda := 3 \cdot \frac{L}{4} \quad \lambda = 367500 \text{ м}$$

$$\text{Скорость света} \quad v_s := 300000000 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Циклическая частота

$$f := \frac{v_s}{\lambda} \quad f = 816.327 \text{ Гц}$$

$$\beta := 2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \quad \beta = 1.71 \times 10^{-5} \frac{1}{\text{м}}$$

Холостой ход

$$u2 := \frac{U1}{|\cos(\beta \cdot L)|}$$

$$u2 = 600000 \quad B$$

$$U(y) := u2 \cdot |\cos(\beta \cdot y)|$$

$$I(y) := \frac{u2}{zc} \cdot |\sin(\beta \cdot y)|$$

$$y := 0, \frac{\lambda}{20} .. L$$

y =

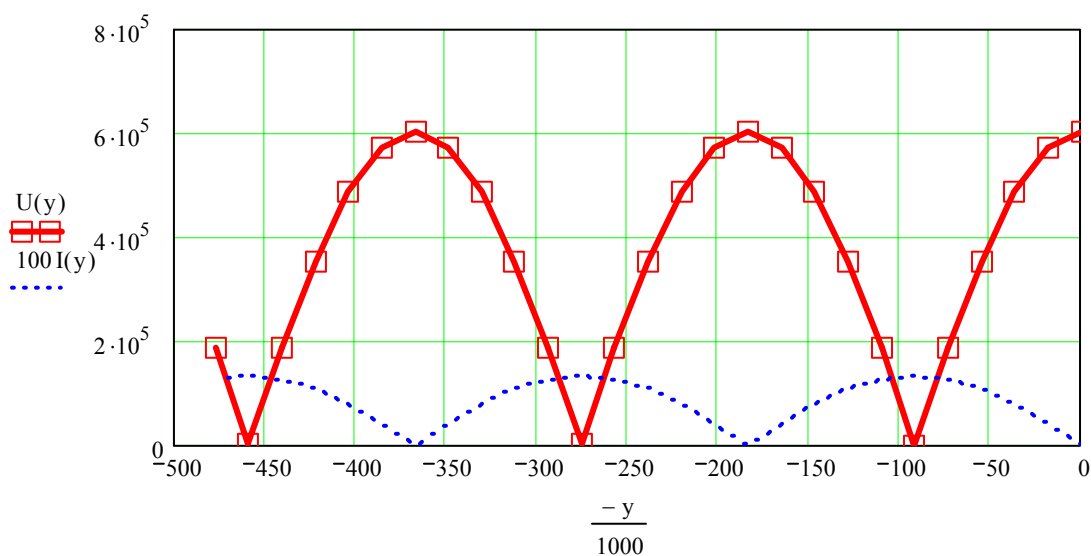
0
1.838·10 ⁴
3.675·10 ⁴
5.513·10 ⁴
7.35·10 ⁴
9.188·10 ⁴
1.103·10 ⁵
1.286·10 ⁵
1.47·10 ⁵
1.654·10 ⁵
1.838·10 ⁵
2.021·10 ⁵
2.205·10 ⁵
2.389·10 ⁵
2.572·10 ⁵
2.756·10 ⁵

U(y) =

6·10 ⁵
5.706·10 ⁵
4.854·10 ⁵
3.527·10 ⁵
1.854·10 ⁵
3.674·10 ⁻¹¹
1.854·10 ⁵
3.527·10 ⁵
4.854·10 ⁵
5.706·10 ⁵
6·10 ⁵
5.706·10 ⁵
4.854·10 ⁵
3.527·10 ⁵
1.854·10 ⁵
1.102·10 ⁻¹⁰

I(y) =

0
412.023
783.714
1.079·10 ³
1.268·10 ³
1.333·10 ³
1.268·10 ³
1.079·10 ³
783.714
412.023
1.633·10 ⁻¹³
412.023
783.714
1.079·10 ³
1.268·10 ³
1.333·10 ³



KM

Короткое замыкание

$$i_2 := \frac{U_1}{(z_c \cdot |\sin(\beta \cdot L)|)} \quad i_2 = 769.8 \quad \text{A}$$

$$U(y) := i_2 \cdot z_c \cdot |\sin(\beta \cdot y)| \quad I(y) := i_2 \cdot |\cos(\beta \cdot y)|$$

y =

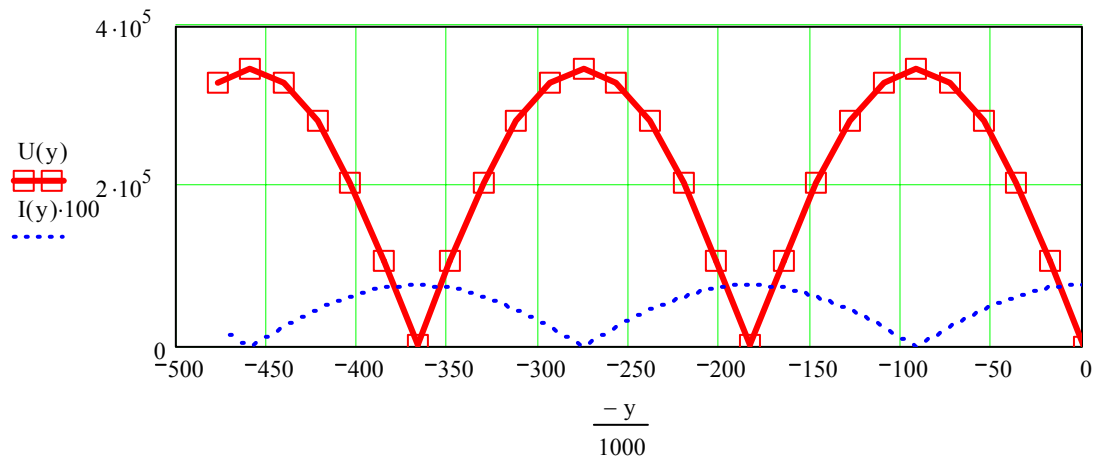
0
1.838·10 ⁴
3.675·10 ⁴
5.513·10 ⁴
7.35·10 ⁴
9.188·10 ⁴
1.103·10 ⁵
1.286·10 ⁵
1.47·10 ⁵
1.654·10 ⁵
1.838·10 ⁵
2.021·10 ⁵
2.205·10 ⁵
2.389·10 ⁵
2.572·10 ⁵
2.756·10 ⁵

U(y) =

0
1.07·10 ⁵
2.036·10 ⁵
2.803·10 ⁵
3.295·10 ⁵
3.464·10 ⁵
3.295·10 ⁵
2.803·10 ⁵
2.036·10 ⁵
1.07·10 ⁵
4.242·10 ⁻¹¹
1.07·10 ⁵
2.036·10 ⁵
2.803·10 ⁵
3.295·10 ⁵
3.464·10 ⁵

I(y) =

769.8
732.124
622.782
452.477
237.881
4.714·10 ⁻¹⁴
237.881
452.477
622.782
732.124
769.8
732.124
622.782
452.477
237.881
1.414·10 ⁻¹³
237.881



км

Нагрузочный режим ($z_2=0.5 \cdot z_c$)

$$z_2 := 0.5 \cdot z_c$$

$$z_2 = 225 \quad \text{Om}$$

$$u_2 := \frac{U_1}{|\cos(\beta \cdot L) + j \cdot 2 \cdot \sin(\beta \cdot L)|}$$

$$u_2 = 166410 \quad \text{B}$$

$$i_2 := \frac{u_2}{z_2}$$

$$i_2 = 739.6 \quad \text{A}$$

$$U(y) := u_2 \cdot |\cos(\beta y) + j \cdot 2 \sin(\beta \cdot y)|$$

$$I(y) := i_2 \cdot |\cos(\beta \cdot y) + j \cdot 0.5 \cdot \sin(\beta \cdot y)|$$

y =

0
1.838·10 ⁴
3.675·10 ⁴
5.513·10 ⁴
7.35·10 ⁴
9.188·10 ⁴
1.103·10 ⁵
1.286·10 ⁵
1.47·10 ⁵
1.654·10 ⁵
1.838·10 ⁵
2.021·10 ⁵
2.205·10 ⁵
2.389·10 ⁵
2.572·10 ⁵
2.756·10 ⁵

m

U(y) =

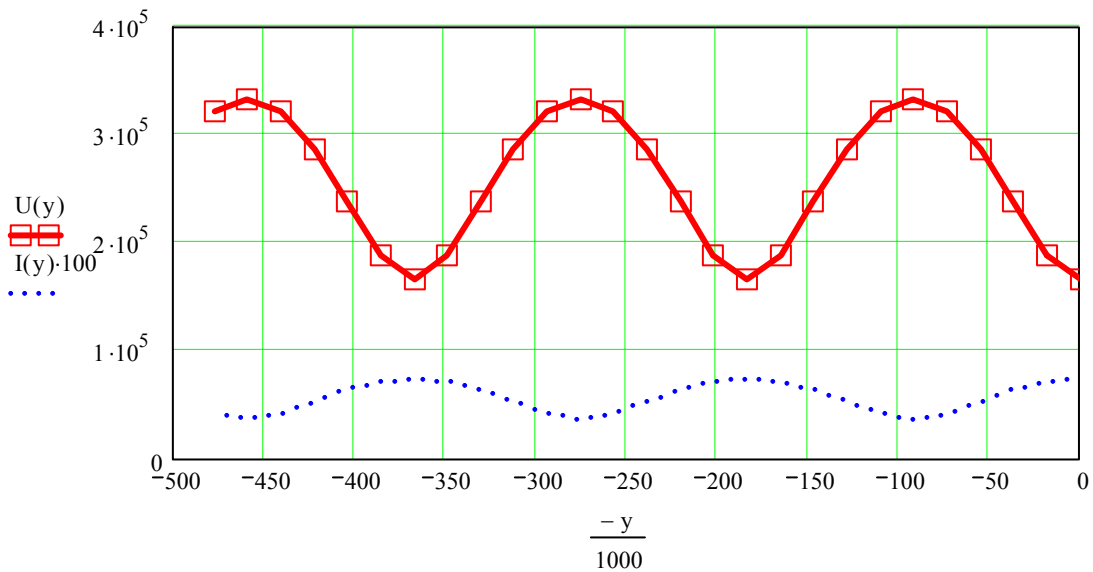
1.664·10 ⁵
1.887·10 ⁵
2.375·10 ⁵
2.865·10 ⁵
3.207·10 ⁵
3.328·10 ⁵
3.207·10 ⁵
2.865·10 ⁵
2.375·10 ⁵
1.887·10 ⁵
1.664·10 ⁵
1.887·10 ⁵
2.375·10 ⁵
2.865·10 ⁵
3.207·10 ⁵
3.328·10 ⁵

B

I(y) =

739.6
712.624
636.607
527.724
419.438
369.8
419.438
527.724
636.607
712.624
739.6
712.624
636.607
527.724
419.438
369.8

A



км

Нагрузочный режим ($z_2=2 \cdot z_c$)

$$z_2 := 2 \cdot z_c$$

$$z_2 = 900 \quad \text{Om}$$

$$u_2 := \frac{U_1}{|\cos(\beta \cdot L) + j \cdot 0.5 \cdot \sin(\beta \cdot L)|}$$

$$u_2 = 453557 \quad \text{B}$$

$$i_2 := \frac{u_2}{z_2}$$

$$i_2 = 503.953 \quad \text{A}$$

$$U(y) := u_2 \cdot |\cos(\beta y) + j \cdot 0.5 \sin(\beta \cdot y)|$$

$$I(y) := i_2 \cdot |\cos(\beta \cdot y) + j \cdot 2 \cdot \sin(\beta \cdot y)|$$

y =

0
$1.838 \cdot 10^4$
$3.675 \cdot 10^4$
$5.513 \cdot 10^4$
$7.35 \cdot 10^4$
$9.188 \cdot 10^4$
$1.103 \cdot 10^5$
$1.286 \cdot 10^5$
$1.47 \cdot 10^5$
$1.654 \cdot 10^5$
$1.838 \cdot 10^5$
$2.021 \cdot 10^5$
$2.205 \cdot 10^5$
$2.389 \cdot 10^5$
$2.572 \cdot 10^5$
$2.756 \cdot 10^5$

m

U(y) =

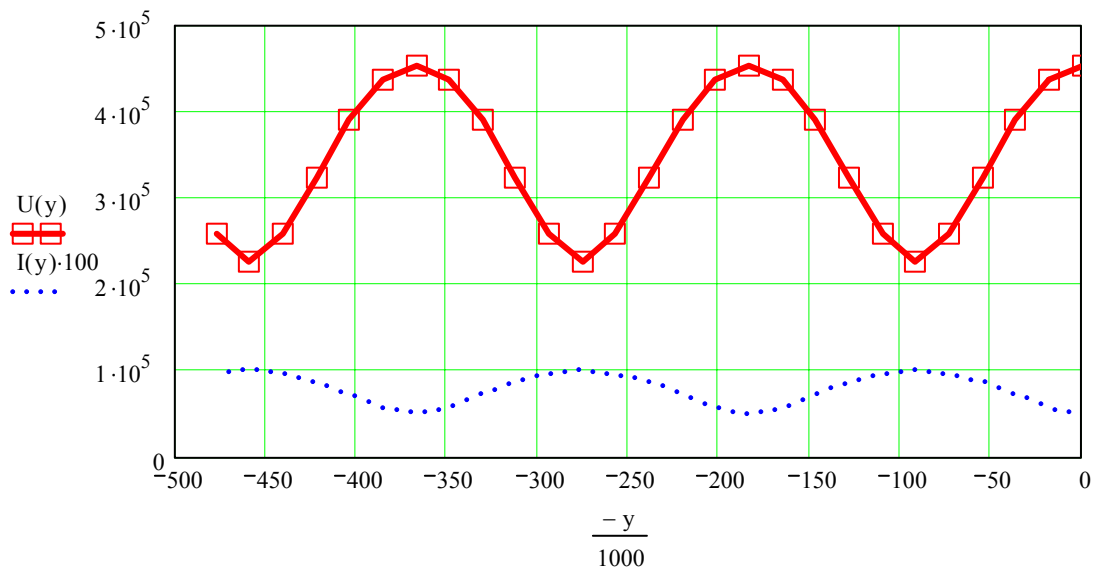
$4.536 \cdot 10^5$
$4.37 \cdot 10^5$
$3.904 \cdot 10^5$
$3.236 \cdot 10^5$
$2.572 \cdot 10^5$
$2.268 \cdot 10^5$
$2.572 \cdot 10^5$
$3.236 \cdot 10^5$
$3.904 \cdot 10^5$
$4.37 \cdot 10^5$
$4.536 \cdot 10^5$
$4.37 \cdot 10^5$
$3.904 \cdot 10^5$
$3.236 \cdot 10^5$
$2.572 \cdot 10^5$
$2.268 \cdot 10^5$

B

I(y) =

503.953
571.597
719.166
867.549
971.142
$1.008 \cdot 10^3$
971.142
867.549
719.166
571.597
503.953
571.597
719.166
867.549
971.142
$1.008 \cdot 10^3$

A



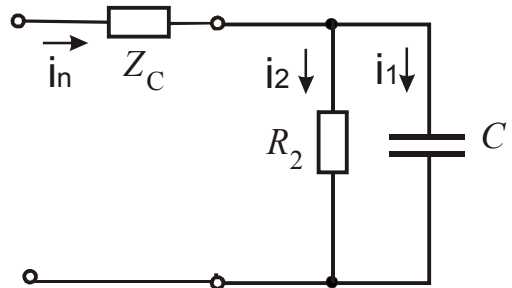
км

Часть 2

Исходные данные:

ЭДС $E := 300000$ В
 параметры приемника $r_2 := 1000$ Ом
 $C := 0.25 \cdot 10^{-6}$ Ф

Схема приемника



РЕШЕНИЕ

Напряжение падающей волны

$u_{pad} := E$ $u_{pad} = 300000$ В

Ток падающей волны

$i_{pad} := \frac{u_{pad}}{z_c}$ $i_{pad} = 600$ А

Расчет переходного режима и отраженных напряжения и тока

Принужденный ток

$i_{pr} := \frac{2 \cdot E}{z_c + r_2}$ $i_{pr} = 400$ А

Характеристическое уравнение

$zbx(p) := \frac{(z_c + z_c \cdot r_2 \cdot C \cdot p + r_2)}{(r_2 \cdot C \cdot p + 1)}$

Приравняв его нулю, находим корень уравнения

$p := \frac{-r_2 - z_c}{z_c \cdot r_2 \cdot C}$ $p = -12000$

Определяем независимые начальные условия

$u_{cpr_0} := r_2 \cdot i_{pr}$ $u_{cpr_0} = 400000$ В

$u_{csv_0} := -u_{cpr_0}$ $u_{csv_0} = -400000$ В

Зависимые начальные условия

$i_{sv_0} := 0$ $i_{1sv_0} := 0$ $i_{2sv_0} := 0$ - начальные значения

Given

$i_{sv_0} = i_{1sv_0} + i_{2sv_0}$
 $i_{sv_0} \cdot z_c + i_{2sv_0} \cdot r_2 = 0$
 $u_{csv_0} - r_2 \cdot i_{2sv_0} = 0$

Уравнения по законам Кирхгофа

Решаем систему уравнений и определяем постоянные интегрирования

$RESH := \text{Find}(i_{sv_0}, i_{1sv_0}, i_{2sv_0})$

$i_{sv_0} := RESH_1$ $i_{sv_0} = 800$ А

$i_{1sv_0} := RESH_2$ $i_{1sv_0} = 1200$ А

$i_{2sv_0} := RESH_3$ $i_{2sv_0} = -400$ А

Зависимости напряжения и тока в конце линии

$i_n(t) := i_{pr} + i_{sv_0} \cdot e^{p \cdot t}$ $i_n(t) := 400 + 800 \cdot e^{-12000 \cdot t}$ А

$u_n(t) := 2 \cdot E - i_n(t) \cdot z_c$ $u_n(t) := 400000 - 400000 \cdot e^{-12000 \cdot t}$ В

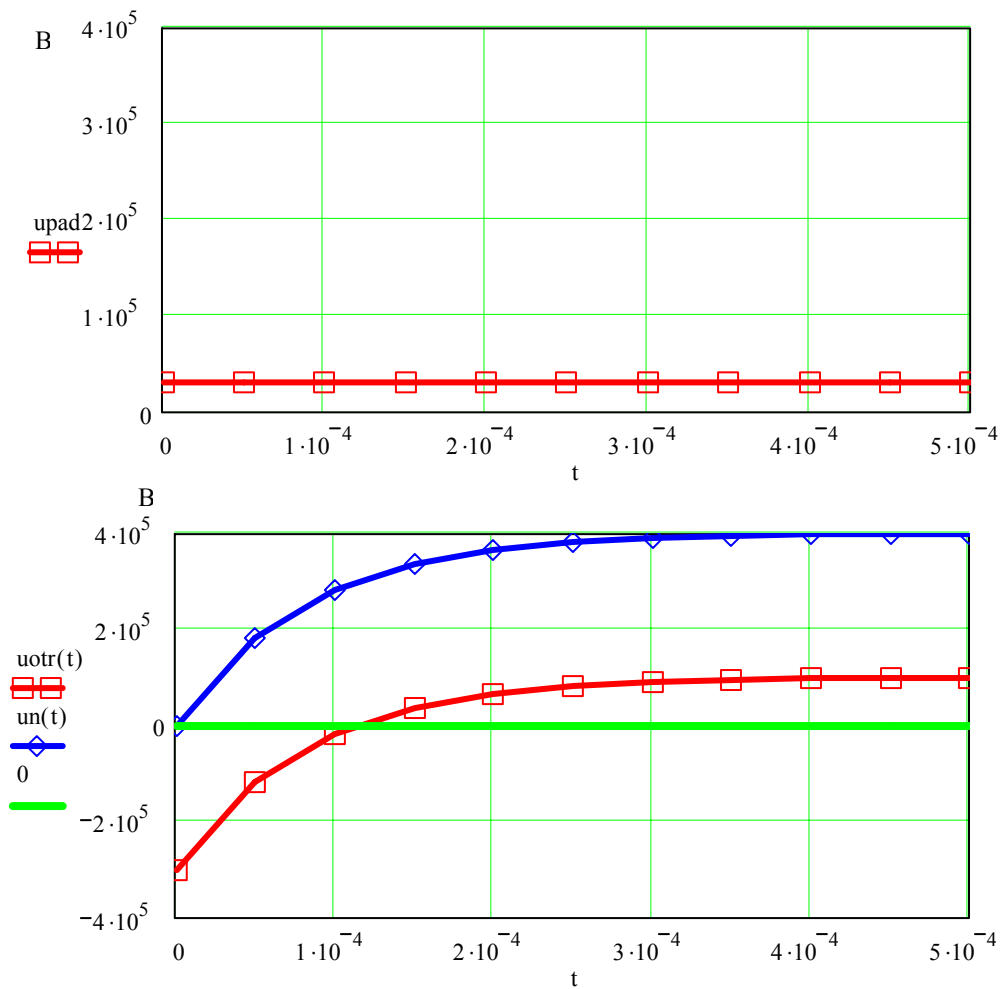
$u_{otr}(t) := u_n(t) - u_{pad}$ $u_{otr}(t) := 100000 - 400000 \cdot e^{-12000 \cdot t}$ В

$i_{otr}(t) := i_{pad} - i_n(t)$ $i_{otr}(t) := 200 + 800 \cdot e^{-12000 \cdot t}$ А

$t := 0, 0.00005, 0.0001$

t =	uotr(t) =	un(t) =
0	$-3 \cdot 10^5$	0
$5 \cdot 10^{-5}$	$-1.195 \cdot 10^5$	$1.805 \cdot 10^5$
$1 \cdot 10^{-4}$	$-2.048 \cdot 10^4$	$2.795 \cdot 10^5$
$1.5 \cdot 10^{-4}$	$3.388 \cdot 10^4$	$3.339 \cdot 10^5$
$2 \cdot 10^{-4}$	$6.371 \cdot 10^4$	$3.637 \cdot 10^5$
$2.5 \cdot 10^{-4}$	$8.009 \cdot 10^4$	$3.801 \cdot 10^5$
$3 \cdot 10^{-4}$	$8.907 \cdot 10^4$	$3.891 \cdot 10^5$
$3.5 \cdot 10^{-4}$	$9.4 \cdot 10^4$	$3.94 \cdot 10^5$
$4 \cdot 10^{-4}$	$9.671 \cdot 10^4$	$3.967 \cdot 10^5$
$4.5 \cdot 10^{-4}$	$9.819 \cdot 10^4$	$3.982 \cdot 10^5$
$5 \cdot 10^{-4}$	$9.901 \cdot 10^4$	$3.99 \cdot 10^5$

Напряжение на концах линии



Время достижения падающей волной конца линии

$$tt := \frac{L}{2 \cdot vs} \quad tt = 8.167 \times 10^{-4} \quad c$$

$$uotr(tt) = 99978 \quad B$$

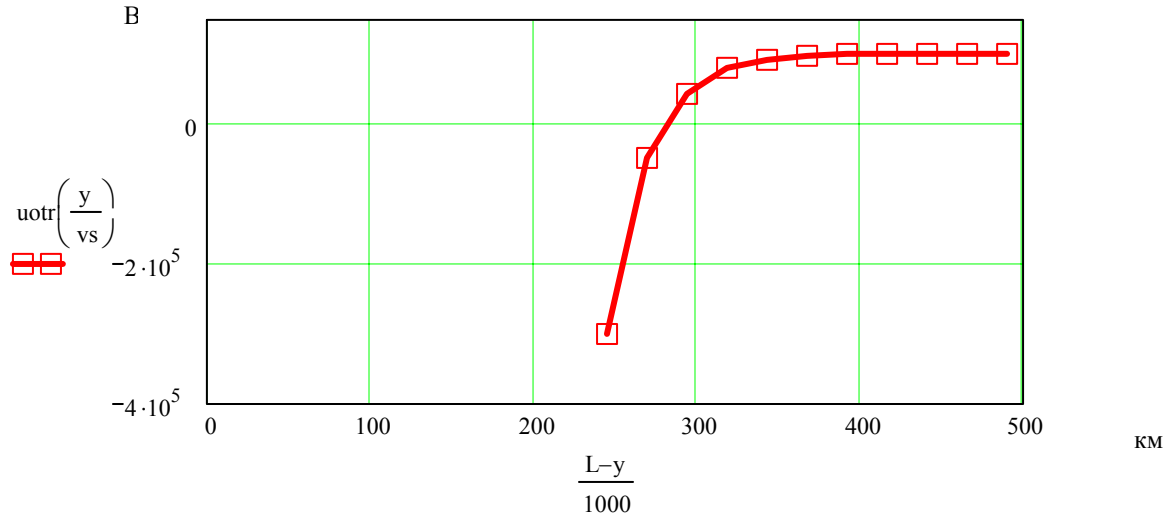
$$iotr(tt) = 200.044 \quad A$$

Отраженная волна прошла половину длины линии

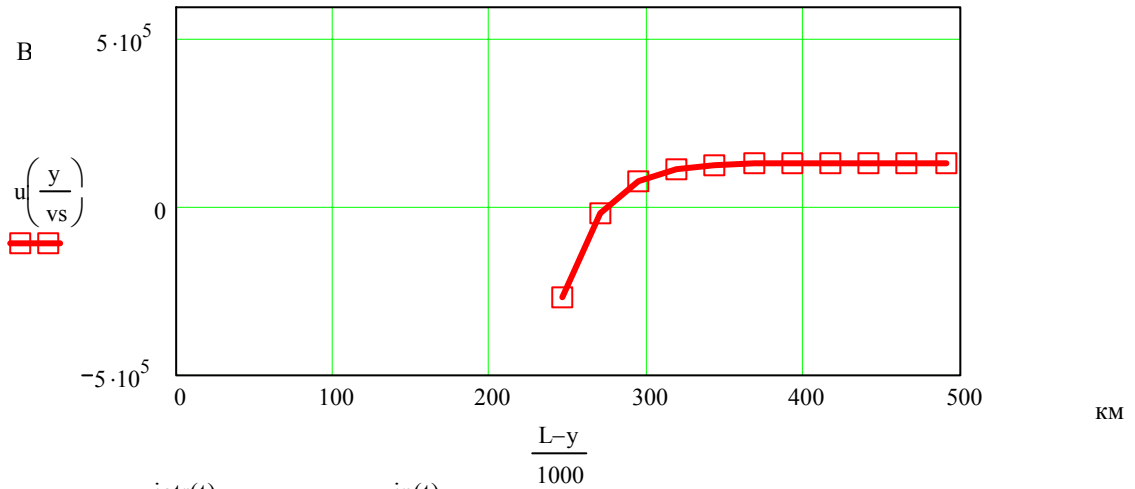
$$u_{otr}(t) := 100000 - 400000 \cdot e^{-12000 \cdot (tt-t)} \quad B$$

$$u_{otr}\left(\frac{L}{4 \cdot vs}\right) = 97021 \quad B$$

$$y := 0, \frac{L}{20} \dots \frac{L}{2}$$



$$u(t) := u_{pad} + u_{otr}(t) \quad B$$



t =

0
$5 \cdot 10^{-5}$
$1 \cdot 10^{-4}$
$1.5 \cdot 10^{-4}$
$2 \cdot 10^{-4}$
$2.5 \cdot 10^{-4}$
$3 \cdot 10^{-4}$
$3.5 \cdot 10^{-4}$
$4 \cdot 10^{-4}$
$4.5 \cdot 10^{-4}$
$5 \cdot 10^{-4}$

ioetr(t) =

$1 \cdot 10^3$
639.049
440.955
332.239
272.574
239.83
221.859
211.996
206.584
203.613
201.983

in(t) =

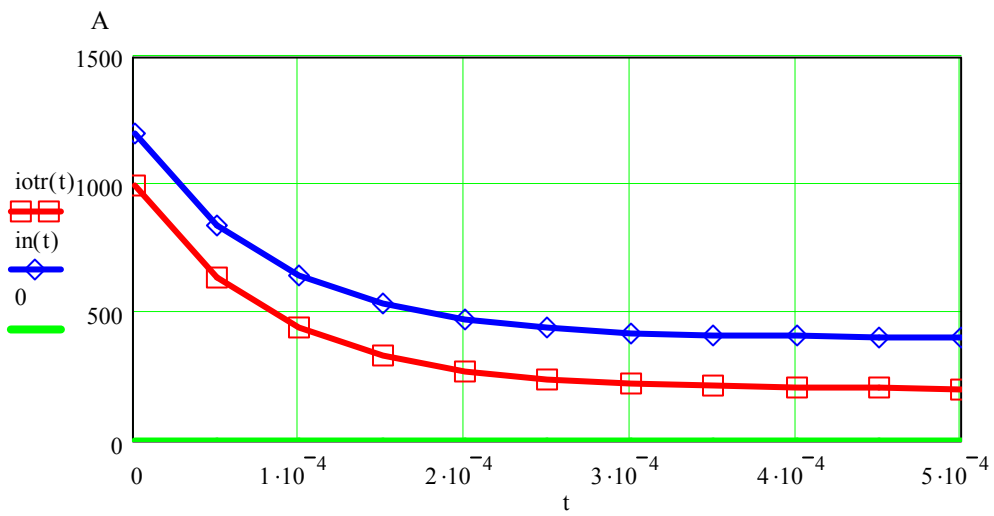
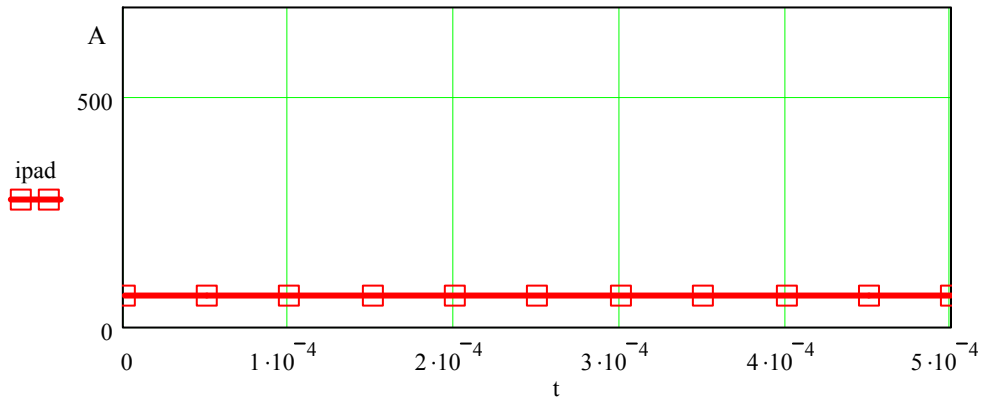
$1.2 \cdot 10^3$
839.049
640.955
532.239
472.574
439.83
421.859
411.996
406.584
403.613
401.983

c

A

A

Ток на концах линии

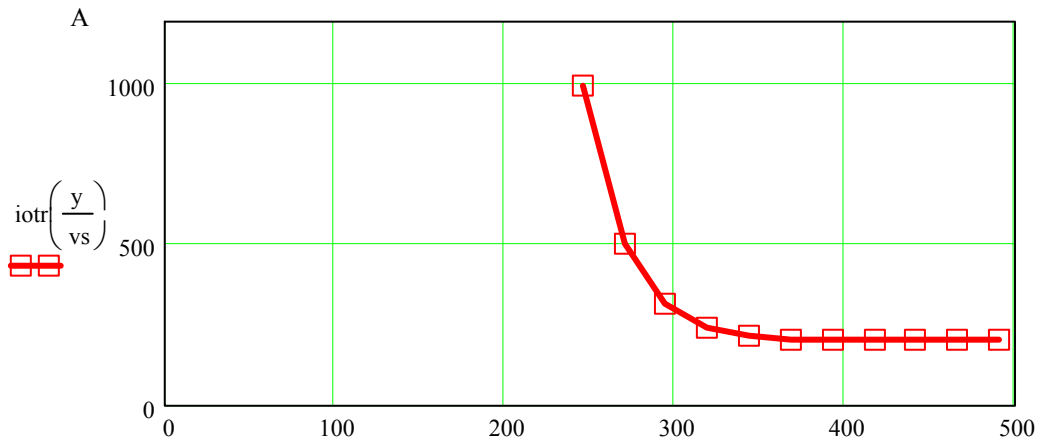


Отраженная волна прошла половину длины линии

$$iotr(t) := 200 + 800 \cdot e^{-12000 \cdot (tt-t)} \quad A$$

$$iotr\left(\frac{L}{4 \cdot vs}\right) = 206 \quad A$$

$$y := 0, \frac{L}{20} .. \frac{L}{2}$$



$$i(t) := ipad + iotr(t) \quad A$$

