

УДК 621.311.018

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ К ИСТОЧНИКУ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Носов Г. В. , Кулешова Е. О., Шишка Н. В.

ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30), e-mail: kuleshova@tpu.ru

Рассмотрено применение частотного метода для расчета переходного процесса при ненулевых начальных условиях в источнике и нулевых начальных условиях в линии и нагрузке. Расчет ведется для одной фазы при подключении нагруженной линии электропередачи к источнику синусоидального напряжения. Источник напряжения и нагрузка содержат синусоидальную ЭДС и пассивные элементы с постоянными параметрами. Используется приведение расчетной схемы к нулевым начальным условиям. Определяемые напряжения и токи зависят от двух переменных: расстояния, отсчитываемого от начала линии, и времени. Методика учитывает многократное прохождение волнами напряжения и тока линии, а также отражение этих волн от нагрузки и источника. Частотный метод расчета переходных процессов можно также использовать для линий связи с импульсной ЭДС произвольной формы. Разработка методики для расчета переходных процессов в однородных цепях с распределенными параметрами, в частности, в линиях электропередачи является актуальной задачей.

Ключевые слова: частотный метод, переходный процесс, линия электропередачи, однородная цепь с распределенными параметрами, пассивная нагрузка, источник, начальные условия, синусоидальная ЭДС, спектральная функция, напряжение, ток, волны, отражение.

CALCULATION OF TRANSITION PROCESS AT CONNECTION THE POWER LINE TO THE SOURCE SINUSOIDAL VOLTAGE

Nosov G. V., Kuleshova E. O., Shishka N. V.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, проспект Ленина, дом 30), e-mail: kuleshova@tpu.ru

Considered the application of the frequency method the of the transition process for non-zero initial conditions in the source and zero initial conditions in the line and load. The calculation is performed for a single phase when connected loaded line to the source of sinusoidal voltage. Voltage source and the load contains a sinusoidal EMF and passive elements with constant parameters. Use transform the design scheme to zero initial conditions. The required voltages and currents depend on two variables: distance, which is counted from the beginning of the line, and time. The method takes into account the multiple passage of waves voltage and current of line, and also the reflection of these waves on the load and the source. Frequency method of calculation of transients can also be used for communication lines с EMF pulse of arbitrary shape. Development of a methodology for the calculation of transients in homogeneous networks with distributed parameters, in particular in the power lines is an important task.

Keywords: frequency method, transient, transmission line, long line, homogeneous circuit with distributed parameters, passive loading, source, entry conditions, sine wave electric moving force, spectral function, voltage, current, waves, reflection.

Введение

Однородные цепи с распределенными параметрами имеют постоянные удельные параметры R_0 (Ом/км), L_0 (Гн/км), G_0 (См/км), C_0 (Ф/км) [1, 3, 4]. К этим цепям относятся воздушные и кабельные линии связи и электропередачи. В линиях электропередачи при подключении и отключении трехфазного источника питания или трехфазной нагрузки происходят переходные процессы. Возникающие при переходных процессах значительные импульсы напряжений и токов могут вывести из строя электрооборудование линии, источник питания и нагрузку. Переходные процессы связаны с прохождением волнами напряжения и тока линий и с отражениями этих волн от нагрузки и источника. Расчет этих

процессов при помощи временных функций с учетом многократных отражений волн сопряжен со значительными трудностями. Поэтому разработка методики применения частотных функций [1, 3] для расчета переходных процессов в однородных цепях с распределенными параметрами, в частности, в линиях электропередачи представляется актуальной задачей, особенно при современном развитии вычислительной техники и стандартных систем компьютерной математики, например, *Mathcad* [2].

Описание метода

Для использования частотного метода расчета переходных процессов необходимо иметь линейную цепь, к которой применим метод наложения [3], т. е. параметры пассивных элементов цепи R, L, C должны быть постоянны, и обязательно абсолютно интегрируемые функции $f_{И}(t)$ источников ЭДС и токов, когда $|f_{И}(t)| < |M| \cdot e^{-|\sigma|t}$ при времени $t > 0$ [1, 3]. В результате спектральные (частотные) функции источников ЭДС и токов определяются при помощи одностороннего прямого преобразования Фурье [1, 3]

$$F_{И}(j\omega) = \int_0^{\infty} f_{И}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

а спектральные функции $F(x, j\omega)$ напряжений и токов в разных точках линии в функции координаты x и угловой частоты ω находятся с использованием основных комплексных уравнений линий с гиперболическими функциями [1, 3]. Далее функции $f(x, t)$ напряжений и токов переходного процесса рассчитываются с использованием формулы, полученной из обратного преобразования Фурье [3]:

$$f(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \{ \operatorname{Re} [F(x, j\omega)] \} \cos(\omega t) \cdot d\omega. \quad (2)$$

Синусоидальные функции $f_{И}(t)$ источников ЭДС и токов не являются абсолютно интегрируемыми, поэтому эти функции будем рассматривать как прямоугольные импульсы с синусным заполнением:

$$f_{И}(t) = \begin{cases} Fm \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \theta) & \text{при } 0 < t < \tau \\ 0 & \text{при } t > \tau \end{cases}, \quad (3)$$

где $\omega_0 = 2\pi f = 314$ 1/с – угловая частота в линиях электропередачи; $\tau = n \cdot t_0$ – длительность импульса; $t_0 \approx \frac{l}{V_0}$ – время пробега волнами напряжения и тока линии длиной l ;

V_0 – (фазовая) скорость перемещения волн в линии при угловой частоте ω_0 ;

n – задаваемое число пробегов волнами линии l .

Поскольку преобразование Фурье (1) предполагает $f_{И}(t)=0$ при времени $t<0$, то необходимо применить приведение цепи к нулевым начальным условиям [3]. В этом случае напряжения и токи переходного процесса находятся в виде суммы синусоидальных функций времени, найденных из расчета установившегося режима цепи до коммутации, и функций времени, найденных частотным методом из расчета цепи после коммутации при нулевых начальных условиях.

Будем полагать, что однородная цепь с распределенными параметрами как линия электропередачи работает в симметричном установившемся и переходном режимах [3], когда токи в нулевом проводе и заземлениях нейтралей трехфазного источника и трехфазной нагрузки равны нулю. Поэтому достаточно без учета сопротивлений нулевого провода и заземлений нейтралей рассмотреть одну фазу источника напряжения, линии и нагрузки при постоянных параметрах пассивных элементов, которые могут быть соединены согласно рис. 1, где фазная ЭДС источника равна

$$e(t) = E_m \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \theta) \quad (4)$$

Предположим, что до коммутации в источнике, линии и нагрузке был установившийся режим.

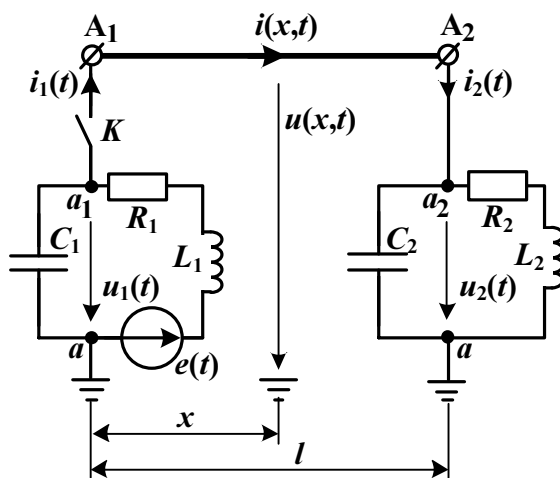


Рис. 1. Расчетная схема на одну фазу (A): R_1, L_1, C_1 и R_2, L_2, C_2 – параметры пассивных элементов источника и нагрузки; $u_1(t), u(x,t), u_2(t)$ – фазные напряжения; $i_1(t), i(x,t), i_2(t)$ – линейные токи; l и x – длина линии и расстояние от начала линии

В формулах (1–2) угловая частота ω изменяется от 0 до ∞ , а время t – от 0 до τ . Поэтому для численных расчетов, исходя из быстродействия компьютера и повышения точности расчетов, примем:

- по возможности наибольшее число расчетных интервалов, например, $N=100$; максимальный, например, $100N$ индекс изменения угловой частоты $k=1,2\dots 100N$, где $k \neq 0$ для предотвращения деления на 0;
- шаг интегрирования по времени $h_t=t_0/N$; по угловой частоте $h_\omega=2\pi/(\tau N)$;
- индекс изменения времени $q=0,1\dots nN$;
- расчетное время $t_q=q \cdot h_t$; расчетная угловая частота $\omega_k=k \cdot h_\omega$.

K – коммутатор (ключ)

В результате согласно (1, 3, 4) спектральная функция источника будет равна:

$$Fu_k = \sum_q \left\{ \left(\frac{fu_q}{j\omega_k} \right) \cdot \left[e^{-j\omega_k \cdot t_q} - e^{-j\omega_k \cdot (t_q + h_t)} \right] \right\}, \quad (5)$$

где $fu_q = F_m \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_q + \theta)$ – числовые значения функции $fu(t)$ в моменты времени t_q .

Однородная линия характеризуется комплексными, зависящими от расчетной угловой частоты ω_k , вторичными параметрами [1, 3]:

- волновое сопротивление

$$\underline{Z}_{Bk} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega_k \cdot L_0}{G_0 + j\omega_k \cdot C_0}}; \quad (6)$$

- постоянная распространения

$$\underline{\gamma}_k = \sqrt{(R_0 + j\omega_k \cdot L_0) \cdot (G_0 + j\omega_k \cdot C_0)} = \alpha_k + j\beta_k; \quad (7)$$

- фазовая скорость

$$V_k = \frac{\omega_k}{\beta_k},$$

причем при угловой частоте ω_0 и постоянной (7) $\gamma_0 = \alpha_0 + j\beta_0$ фазовая скорость равна

$$V_0 = \frac{\omega_0}{\beta_0}.$$

Для указанной на рис. 1 схемы соединения пассивных элементов источника и нагрузки можно записать эквивалентные комплексные сопротивления фазы источника

$$\underline{Z}_{Uk} = \frac{R_1 + j\omega_k \cdot L_1}{1 - \omega_k^2 \cdot L_1 \cdot C_1 + j\omega_k \cdot R_1 \cdot C_1}; \quad (8)$$

и нагрузки

$$\underline{Z}_{Hk} = \frac{R_2 + j\omega_k \cdot L_2}{1 - \omega_k^2 \cdot L_2 \cdot C_2 + j\omega_k \cdot R_2 \cdot C_2}. \quad (9)$$

В результате, на основании комплексных уравнений линий с гиперболическими функциями [1, 3] определяем входное комплексное сопротивление линии (рис. 1)

относительно зажима A_1 с учетом сопротивлений (6) и (9)

$$\underline{Z}_{1k} = \underline{Z}_{Bk} \cdot \frac{\underline{Z}_{Bk} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot l) + \underline{Z}_{Hk} \cdot \text{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot l)}{\underline{Z}_{Bk} \cdot \text{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot l) + \underline{Z}_{Hk} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot l)}. \quad (10)$$

Рассмотрим расчет переходного процесса в схеме (рис. 1) с использованием приведения этой схемы к нулевым начальным условиям.

Коммутатор K замыкается, в источнике – ненулевые начальные условия, в линии и нагрузке – нулевые начальные условия.

На разомкнутом ключе K из расчета символическим методом [3] цепи источника с ЭДС (4) находим комплексную амплитуду напряжения

$$U_K = \frac{E_m \cdot e^{j\theta}}{1 - \omega_0^2 \cdot L_1 \cdot C_1 + j\omega_0 \cdot R_1 \cdot C_1} = U_K \cdot e^{j\delta},$$

числовые значения этого напряжения в моменты времени $t=t_q$

$$u_{Kq} = U_K \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_q + \delta). \quad (11)$$

С учетом (5) и (11) записываем спектральную функцию

$$U_{Kk} = \sum_q \left\{ \left(\frac{u_{Kq}}{j\omega_k} \right) \cdot \left[e^{-j\omega_k \cdot t_q} - e^{-j\omega_k \cdot (t_q + h_t)} \right] \right\}. \quad (12)$$

Далее после замыкания ключа K с использованием формул (6–10, 12) определяем при $x=0$ спектральную функцию входного тока

$$I_{1k} = \frac{U_{Kk}}{\underline{Z}_{Uk} + \underline{Z}_{1k}} \quad (13)$$

и входного напряжения линии

$$U_{1k} = U_{Kk} - \underline{Z}_{Uk} \cdot I_{1k}. \quad (14)$$

На расстоянии x от начала линии на основании уравнений однородной линии в гиперболических функциях [3] и формул (6, 7, 13, 14) можно записать спектральные функции напряжения и тока для угловых частот ω_k :

$$\begin{cases} U_{xk} = U_{1k} \cdot \text{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot x) - I_{1k} \cdot \underline{Z}_{Bk} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot x) \\ I_{xk} = -\frac{U_{1k}}{\underline{Z}_{Bk}} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot x) + I_{1k} \cdot \text{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot x) \end{cases}. \quad (15)$$

Согласно (2) с использованием (15) определяем числовые значения напряжения и тока на расстоянии x от начала линии в моменты времени $t=t_q$:

$$\begin{cases} u(x, t_q) = \frac{2}{\pi} \sum_k \left[\operatorname{Re}(U_{x_k}) \cdot h_{\omega} \cdot \cos(\omega_k \cdot t_q) \right] \\ i(x, t_q) = \frac{2}{\pi} \sum_k \left[\operatorname{Re}(I_{x_k}) \cdot h_{\omega} \cdot \cos(\omega_k \cdot t_q) \right] \end{cases} \quad (16)$$

Если зафиксировать координату x от 0 до l , то по вышеприведенным формулам можно численно рассчитать изменение во времени t напряжения и тока в линии.

Результаты

Разработан алгоритм вычислений с использованием системы *Mathcad* и проведены расчеты напряжений и токов переходного процесса в воздушной линии электропередачи при следующих параметрах [4, 5]: $E_m=200$ кВ; $\omega_0=314$ 1/с; $\theta=\pi/2$; $\tau=5$ мс; $t_0=1$ мс; $n=5$; $R_0=0,12$ Ом/км; $L_0=1,36 \cdot 10^{-3}$ Гн/км; $G_0=9,71 \cdot 10^{-9}$ См/км; $C_0=8,597 \cdot 10^{-9}$ Ф/км; $V_0=2,897 \cdot 10^5$ км/с; $R_2=10 \cdot R_1=100$ Ом; $L_2=10 \cdot L_1=2$ Гн; $C_1=10 \cdot C_2=5$ мкФ.

На рис. 2, 3 ($l=289,7$ км) и рис. 4, 5 ($l=1448,5$ км) приведены примеры расчетных зависимостей при замыкании ключа K .

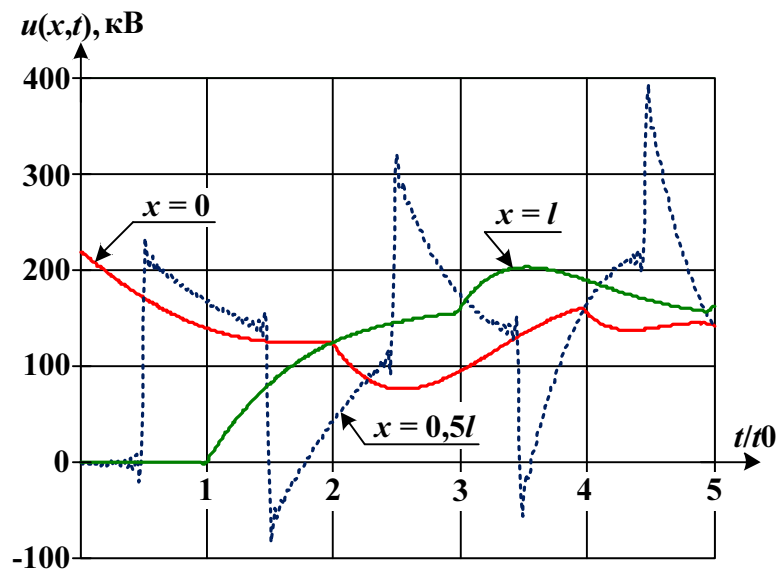


Рис. 2. Расчетные зависимости для напряжений в линии при длине линии $l=289,7$ км

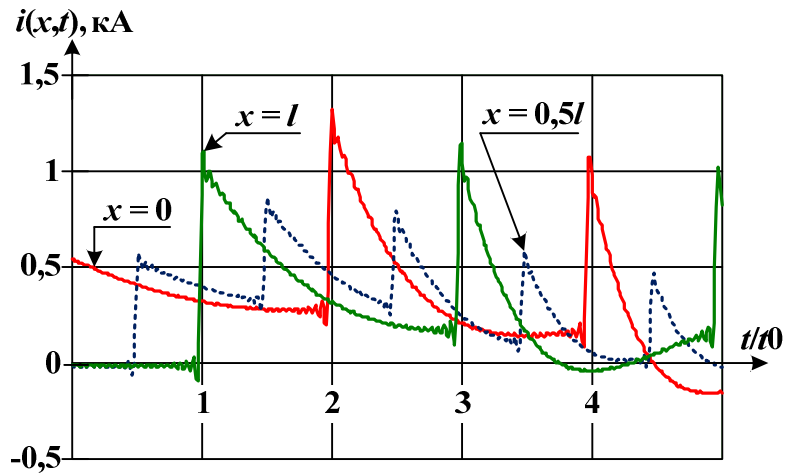


Рис. 3. Расчетные зависимости для токов в линии при длине линии $l=289,7$ км

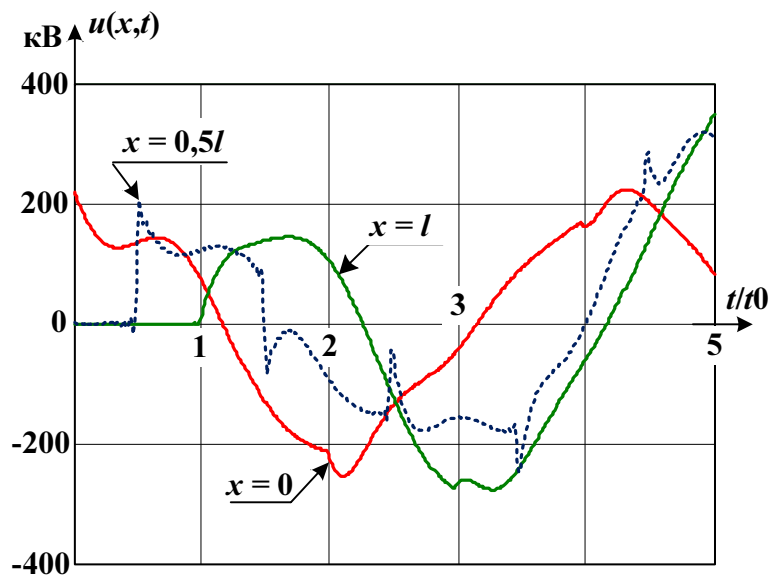


Рис. 4. Расчетные зависимости для напряжений в линии при длине линии $l=1448,5$ км

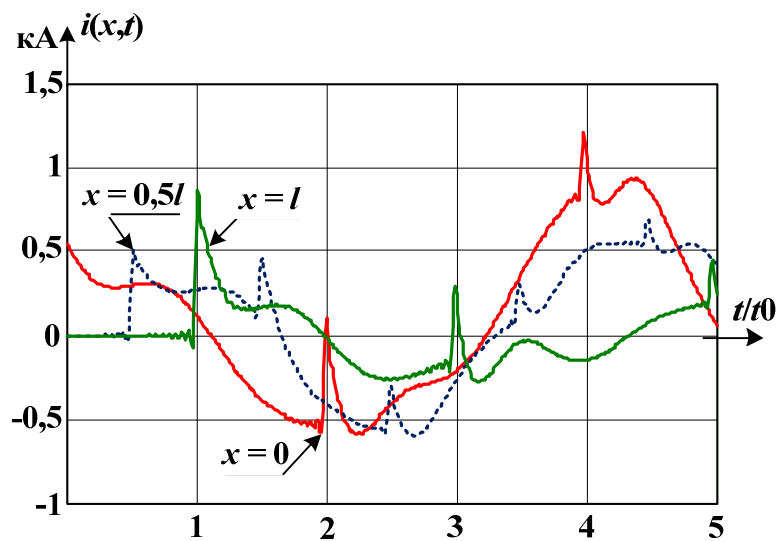


Рис. 5. Расчетные зависимости для токов в линии при длине линии $l=1448,5$ км

В конце линии при $x=l$ получили напряжение $u(l,t_0)=0$ (рис. 2) и ток $i(l,t_0)\approx 2\cdot i(0,0)$ (рис. 3), что соответствует первому моменту прихода падающих волн напряжения и тока в нагрузку, когда емкость C_2 является «закороткой».

Частотный метод расчета переходных процессов можно также использовать для линий связи с импульсной ЭДС $e(t)$ произвольной формы.

Выводы

1. Рассмотрено применение частотного метода для расчета переходных процессов в одной фазе нагруженной линии электропередачи при подключении источника напряжения. Показано, что частотный метод достаточно эффективен при использовании стандартных систем компьютерной математики, например, *Mathcad*.
2. Переходные процессы в линиях рассчитываются с учетом двух переменных: расстояния, отсчитываемого от начала линии, и времени.
3. Методика учитывает многократное прохождение волнами напряжения и тока линии, а также отражение этих волн от нагрузки и источника.
4. Результаты расчетов согласуются с теорией переходных процессов в однородных линиях при различных нагрузках.
5. Использование алгебраических уравнений в комплексной форме вместо дифференциальных уравнений существенно упрощает алгоритм вычислений.

Список литературы

1. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л. Теоретические основы электротехники. Т.2. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.
2. Дьяконов В. П. Mathcad 8/2000: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2000. – 592 с.
3. Теоретические основы электротехники. Т.1. Основы теории линейных цепей / под ред. П. А. Ионкина. – М.: Высшая школа, 1976. – 544 с.
4. Теоретические основы электротехники. Т.2. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля / под ред. П. А. Ионкина. – М.: Высшая школа, 1976. – 383 с.
5. Электротехнический справочник. Т.1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / под ред. В. Г. Герасимова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.

Рецензенты:

Усов Юрий Петрович, д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.

Федор Юрьевич Канев, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск.