УДК 621.311.018

# ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОГО МЕТОДА ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОРОДНЫХ ЦЕПЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Г.В. Носов

Томский политехнический университет
E-mail: nosov@elti.tpu.ru

*Рассмотрено применение частотного метода для расчета переходных процессов в однородных цепях с распределенными параметрами на примере одной фазы линии электропередачи при подключении и отключении источника и нагрузки. К линии подключены источник и нагрузка, содержащие синусоидальную ЭДС и пассивные элементы с постоянными параметрами. Используется приведение расчетных схем 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 и отражение этих волн от нагрузки и источника.*

***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.*

***Key words:***
*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.*

Однородные цепи с распределенными параметрами имеют постоянные удельные параметры $R0$ (Ом/км), $L0$ (Гн/км), $G0$ (См/км), $C0$ (Ф/км) [1–3]. 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 в линиях 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, 2] 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 [4].

Для использования частотного метода расчета переходных процессов необходимо иметь линейную цепь, к которой применим метод наложения [1], т. е. параметры пассивных элементов цепи $R$, $L$, $C$ должны быть постоянны, и обязательны абсолютно интегрируемые функции $fu(t)$ источников ЭДС и токов, когда $|fu(t)|<|M|\cdot e^{-|\sigma|t}$ при времени $t>0$ [1, 2]. В результате спектральные (частотные) функции источников ЭДС и токов определяются при помощи одностороннего прямого преобразования Фурье [1, 2]

$$Fu(j\omega)=\int_0^\infty fu(t)\cdot e^{-j\omega t}dt, \qquad (1)$$

а спектральные функции $F(x,j\omega)$ напряжений и токов в разных точках линии в функции координаты $x$ и угловой частоты $\omega$ находятся с использованием основных комплексных уравнений линий с гиперболическими функциями [1, 2]. Далее функции $f(x,t)$ напряжений и токов переходного процесса рассчитываются с использованием формулы, полученной из обратного преобразования Фурье [1]:

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

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

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

где $\omega 0=2\pi f=314$ 1/с – угловая частота в линиях электропередачи; $\tau=n\cdot t0$ – длительность импульса; $t0\approx l/V0$ – время пробега волнами напряжения и тока линии длиной $l$; $V0$ – (фазовая) скорость перемещения волн в линии при угловой частоте $\omega 0$; $n$ – задаваемое число пробегов волнами линии $l$.

Поскольку преобразование Фурье (1) предполагает $fu(t)=0$ при времени $t<0$, то логично применить приведение цепи к нулевым начальным условиям [1]. 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 [1], 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

$$e(t) = Em \cdot \sin(\omega 0 \cdot t + \theta). \qquad (4)$$

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

В формулах (1–2) угловая частота $\omega$ изменяется от 0 до $\infty$, а время $t$ – от 0 до $\tau$. 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...$100N$, где $k\neq0$ для предотвращения деления на 0;
- шаг интегрирования по времени $ht=t0/N$; по угловой частоте $h\omega=2\pi/(\tau\cdot N)$;
- индекс изменения времени $q$=0,1...$n\cdot N$;
- расчетное время $t_q=q\cdot ht$; угловая частота $\omega_k=k\cdot h\omega$.

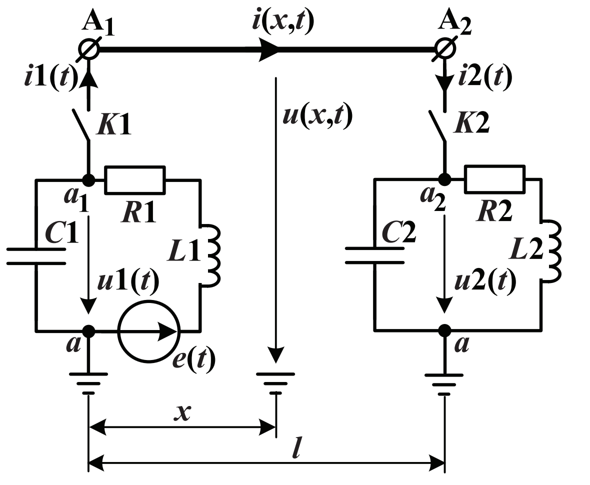


***Рис. 1.*** *Расчетная схема на одну фазу (А): R1, L1, C1 и R2, L2, C2 – параметры пассивных элементов источника и нагрузки; u1(t), u(x,t), u2(t) – фазные напряжения; i1(t), i(x,t), i2(t) – линейные токи; l и x – длина линии и расстояние от начала линии; K1, K2 – коммутаторы (ключи)*

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

$$\dot{Fu}_k = \sum_q \left\{ \left( \frac{fu_q}{j\omega_k} \right) \cdot [e^{-j\omega_k \cdot t_q} - e^{-j\omega_k \cdot (t_q + ht)}] \right\}, \qquad (5)$$

где $fu_q=Fm\cdot\sin(\omega0\cdot t_q+\theta)$ – числовые значения функции $fu(t)$ в моменты времени $t_q$.

Однородная линия характеризуется комплексными, зависящими от расчетной угловой частоты $\omega_k$, вторичными параметрами [1, 2]:

- волновое сопротивление

$$\underline{ZB}_k = \sqrt{\frac{R0 + j\omega_k \cdot L0}{G0 + j\omega_k \cdot C0}}; \qquad (6)$$

- постоянная распространения

$$\underline{\gamma}_k = \sqrt{(R0 + j\omega_k \cdot L0)\cdot(G0 + j\omega_k \cdot C0)} = \alpha_k + j\beta_k\ ; \quad (7)$$

- фазовая скорость

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

причем при угловой частоте $\omega0$ и постоянной (7) $\gamma0=\alpha0+j\beta0$ фазовая скорость равна

$$V0 = \frac{\omega 0}{\beta 0}.$$

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

$$\underline{ZU}_k = \frac{R1 + j\omega_k \cdot L1}{1 - \omega_k^2 \cdot L1 \cdot C1 + j\omega_k \cdot R1 \cdot C1} \qquad (8)$$

и нагрузки

$$\underline{ZH}_k = \frac{R2 + j\omega_k \cdot L2}{1 - \omega_k^2 \cdot L2 \cdot C2 + j\omega_k \cdot R2 \cdot C2}. \qquad (9)$$

В результате, на основании комплексных уравнений линий с гиперболическими функциями [1, 2], определяем входные комплексные сопротивления линии (рис. 1):

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

$$\underline{Z1}_k = \underline{ZB}_k \cdot \frac{\underline{ZB}_k \cdot \mathrm{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot l) + \underline{ZH}_k \cdot \mathrm{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot l)}{\underline{ZB}_k \cdot \mathrm{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot l) + \underline{ZH}_k \cdot \mathrm{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot l)}; \qquad (10)$$

относительно зажима $A_2$ с учетом сопротивлений (6) и (8)

$$\underline{Z2}_k = \underline{ZB}_k \cdot \frac{\underline{ZB}_k \cdot \mathrm{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot l) + \underline{ZU}_k \cdot \mathrm{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot l)}{\underline{ZB}_k \cdot \mathrm{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot l) + \underline{ZU}_k \cdot \mathrm{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot l)}. \qquad (11)$$

Рассмотрим четыре возможных варианта переходных процессов в расчетной схеме (рис. 1) с использованием приведения этой схемы к нулевым начальным условиям.

1. Коммутатор $K1$ замыкается, коммутатор $K2$ замкнут; в источнике – ненулевые начальные условия, в линии и нагрузке – нулевые начальные условия.

На разомкнутом ключе $K1$ из расчета символическим методом [1] цепи источника с ЭДС (4) находим комплексную амплитуду напряжения

$$\dot{UK}1 = \frac{Em \cdot e^{j\theta}}{1 - \omega 0^2 \cdot L1 \cdot C1 + j\omega 0 \cdot R1 \cdot C1} = UK1 \cdot e^{j\delta},$$

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

$$uK1_q = UK1 \cdot \sin(\omega 0 \cdot t_q + \delta). \qquad (12)$$

С учетом (5) и (12) записываем спектральную функцию

$$\dot{UK1}_k = \sum_q \left\{ \left( \frac{uK1_q}{j\omega_k} \right) \cdot [e^{-j\omega_k \cdot t_q} - e^{-j\omega_k \cdot (t_q + ht)}] \right\}. \quad (13)$$

Далее после замыкания ключа $K1$ с использованием формул (6–10, 13) определяем при $x$=0 спектральную функцию входного тока

$$\dot{I1}_k = \frac{\dot{UK1}_k}{\underline{ZU}_k + \underline{Z1}_k} \quad (14)$$

и входного напряжения линии

$$\dot{U1}_k = \dot{UK1}_k - \underline{ZU}_k \cdot \dot{I1}_k\,. \quad (15)$$

На расстоянии $x$ от начала линии на основании уравнений однородной линии в гиперболических функциях [1] и формул (6, 7, 14, 15) можно записать спектральные функции напряжения и тока для угловых частот $\omega_k$:

$$\begin{cases} \dot{Ux}_k = \dot{U1}_k \cdot \mathrm{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot x) - \dot{I1}_k \cdot \underline{ZB}_k \cdot \mathrm{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot x) \\ \dot{Ix}_k = -\dfrac{\dot{U1}_k}{\underline{ZB}_k} \cdot \mathrm{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot x) + \dot{I1}_k \cdot \mathrm{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot x) \end{cases}. \quad (16)$$

Согласно (2) с использованием (16) определяем числовые значения напряжения и тока на расстоянии $x$ от начала линии в моменты времени $t=t_q$:

$$\begin{cases} u(x, t_q) = \dfrac{2}{\pi} \sum_k [\mathrm{Re}(\dot{Ux}_k) \cdot h\omega \cdot \cos(\omega_k \cdot t_q)] \\ i(x, t_q) = \dfrac{2}{\pi} \sum_k [\mathrm{Re}(\dot{Ix}_k) \cdot h\omega \cdot \cos(\omega_k \cdot t_q)] \end{cases}. \quad (17)$$

2. Коммутатор $K1$ размыкается, коммутатор $K2$ замкнут; в источнике, линии и нагрузке – ненулевые начальные условия.

При замкнутом ключе $K1$ из расчета цепи символическим методом при угловой частоте $\omega0$ и $x$=0 с учетом (10), когда $\underline{Z1}_k=\underline{Z1}_s$ при $\omega_s=s\cdot h\omega\approx\omega0$, находим комплексные амплитуды входного тока

$$\dot{I1}\text{д} = \frac{Em \cdot e^{j\theta}}{\underline{Z1}_s + (R1 + j\omega0 \cdot L1) \cdot (1 + j\omega0 \cdot C1 \cdot \underline{Z1}_s)} = I1\text{д} \cdot e^{j\lambda} \quad (18)$$

и входного напряжения линии

$$\dot{U1}\text{д} = \underline{Z1}_s \cdot \dot{I1}\text{д}, \quad (19)$$

числовые значения входного тока в моменты времени $t=t_q$

$$i1\text{д}_q = I1\text{д} \cdot \sin(\omega0 \cdot t_q + \lambda), \quad (20)$$

тогда на основании (5) и (20) можно вычислить спектральную функцию входного тока

$$\dot{I1}\text{д}_k = \sum_q \left\{ \left( \frac{i1\text{д}_q}{j\omega_k} \right) \cdot [e^{-j\omega_k \cdot t_q} - e^{-j\omega_k \cdot (t_q + ht)}] \right\}. \quad (21)$$

Далее на расстоянии $x$ от начала линии на основании уравнений однородной линии в гиперболических функциях (16) и формул (6, 7, 18, 19) можно записать комплексные амплитуды напряжения и тока при замкнутом ключе $K1$ для угловой частоты $\omega_s\approx\omega0$:

$$\begin{cases} \dot{Ux}\text{д} = \dot{U1}\text{д} \cdot \mathrm{ch}(\underline{\gamma}_s \cdot x) - \dot{I1}\text{д} \cdot \underline{ZB}_s \cdot \mathrm{sh}(\underline{\gamma}_s \cdot x) = \\ \quad = Ux\text{д} \cdot e^{j\lambda x1} \\ \dot{Ix}\text{д} = -\dfrac{\dot{U1}\text{д}}{\underline{ZB}_s} \cdot \mathrm{sh}(\underline{\gamma}_s \cdot x) + \dot{I1}\text{д} \cdot \mathrm{ch}(\underline{\gamma}_s \cdot x) = \\ \quad = Ix\text{д} \cdot e^{j\lambda x2} \end{cases}. \quad (22)$$

В результате при замкнутом ключе $K1$ на расстоянии $x$ от начала линии, исходя из (22), определяем числовые значения напряжения и тока в моменты времени $t=t_q$:

$$\begin{cases} u\text{д}(x, t_q) = Ux\text{д} \cdot \sin(\omega0 \cdot t_q + \lambda x1) \\ i\text{д}(x, t_q) = Ix\text{д} \cdot \sin(\omega0 \cdot t_q + \lambda x2) \end{cases}. \quad (23)$$

Затем при подключенном к началу линии ($x$=0) источнике тока $\dot{J1}_k=-\dot{I1}\text{д}_k$ на основании (10, 16, 21) рассчитываем спектральные функции напряжения и тока

$$\begin{cases} \dot{Ux}\text{п}_k = -\dot{I1}\text{д}_k \cdot \underline{Z1}_k \cdot \mathrm{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot x) + \\ \quad + \dot{I1}\text{д}_k \cdot \underline{ZB}_k \cdot \mathrm{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot x) \\ \dot{Ix}\text{п}_k = \dfrac{\dot{I1}\text{д}_k \cdot \underline{Z1}_k}{\underline{ZB}_k} \cdot \mathrm{sh}(\underline{\gamma}_k \cdot x) - \\ \quad - \dot{I1}\text{д}_k \cdot \mathrm{ch}(\underline{\gamma}_k \cdot x) \end{cases}. \quad (24)$$

Согласно (2) с использованием принципа наложения [1] и формул (23, 24) определяем числовые значения напряжения и тока на расстоянии $x$ от начала линии в моменты времени $t=t_q$:

$$\begin{cases} u(x, t_q) = u\text{д}(x, t_q) + \\ \quad + \dfrac{2}{\pi} \cdot \sum_k [\mathrm{Re}(\dot{Ux}\text{п}_k) \cdot h\omega \cdot \cos(\omega_k \cdot t_q)] \\ i(x, t_q) = i\text{д}(x, t_q) + \\ \quad + \dfrac{2}{\pi} \cdot \sum_k [\mathrm{Re}(\dot{Ix}\text{п}_k) \cdot h\omega \cdot \cos(\omega_k \cdot t_q)] \end{cases}. \quad (25)$$

3. Коммутатор $K2$ замыкается, коммутатор $K1$ замкнут; в источнике и линии – ненулевые начальные условия, в нагрузке – нулевые начальные условия.

При разомкнутом ключе $K2$ из расчета цепи при $\omega_s\approx\omega0$ и $x$=0 находим по (18, 19) комплексные амплитуды тока и напряжения, в которых из формулы (10) при $\underline{ZH}_s=\infty$ используем

$$\underline{Z1}_s = \underline{ZB}_s \cdot \frac{\mathrm{ch}(\underline{\gamma}_s \cdot l)}{\mathrm{sh}(\underline{\gamma}_s \cdot l)}.$$

Далее при разомкнутом ключе $K2$ по (22, 23) находим числовые значения напряжения и тока на расстоянии $x$ от начала линии в моменты времени $t=t_q$, тогда при $x=l$ из формулы (23) напряжение на разомкнутом ключе $K2$ будет следующим

$$uK2\text{д}_q = u\text{д}(l,t_q) = UK2\text{д} \cdot \sin(\omega 0 \cdot t_q + \varphi). \quad (26)$$

С учетом (5) и (26) записываем спектральную функцию этого напряжения

$$U\dot{K}2\text{д}_k = \sum_q \left\{ \left( \frac{uK2\text{д}_q}{j\omega_k} \right) \cdot [e^{-j\omega_k \cdot t_q} - e^{-j\omega_k \cdot (t_q + ht)}] \right\}. \quad (27)$$

Затем после замыкания ключа $K2$ с использованием формул (6–9, 11, 27) определяем при $x=l$ спектральную функцию выходного тока

$$I\dot{2}\text{п}_k = \frac{U\dot{K}2\text{д}_k}{\underline{ZH}_k + \underline{Z2}_k} \quad (28)$$

и выходного напряжения линии

$$U\dot{2}\text{п}_k = -U\dot{K}2\text{д}_k + \underline{ZH}_k \cdot I\dot{2}\text{п}_k\,. \quad (29)$$

На расстоянии $x$ от начала линии на основании уравнений однородной линии в гиперболических функциях [1] и формул (6, 7, 28, 29) можно записать спектральные функции напряжения и тока для угловых частот $\omega_k$:

$$\begin{cases} U\dot{x}\text{п}_k = U\dot{2}\text{п}_k \cdot \mathrm{ch}[\underline{\gamma}_k \cdot (l-x)] + \\ \quad + I\dot{2}\text{п}_k \cdot \underline{ZB}_k \cdot \mathrm{sh}[\underline{\gamma}_k \cdot (l-x)] \\ I\dot{x}\text{п}_k = \dfrac{U\dot{2}\text{п}_k}{\underline{ZB}_k} \cdot \mathrm{sh}[\underline{\gamma}_k \cdot (l-x)] + \\ \quad + I\dot{2}\text{п}_k \cdot \mathrm{ch}[\underline{\gamma}_k \cdot (l-x)] \end{cases}. \quad (30)$$

Согласно (2) с использованием принципа наложения и формул (23, 30) определяем по (25) числовые значения напряжения и тока на расстоянии $x$ от начала линии в моменты времени $t=t_q$.

4. Коммутатор $K2$ размыкается, коммутатор $K1$ замкнут; в источнике, линии и нагрузке – ненулевые начальные условия.

По соотношениям (18, 19, 22, 23) рассчитываем установившийся режим до размыкания ключа $K2$ и при $x=l$ находим числовые значения выходного тока в моменты времени $t=t_q$

$$i2\text{д}_q = i\text{д}(l,t_q) = I2\text{д} \cdot \sin(\omega 0 \cdot t_q + \psi), \quad (31)$$

тогда на основании (5) и (31) вычисляем его спектральную функцию

$$I\dot{2}\text{д}_k = \sum_q \left\{ \left( \frac{i2\text{д}_q}{j\omega_k} \right) \cdot [e^{-j\omega_k \cdot t_q} - e^{-j\omega_k \cdot (t_q + ht)}] \right\}.$$

Затем при подключенном к концу линии ($x=l$) источнике тока $\dot{J}2_k = -I\dot{2}\text{д}_k$ на основании (11, 30) записываем спектральные функции напряжения и тока:

$$U\dot{2}\text{п}_k = \underline{Z2}_k \cdot I\dot{2}\text{д}_k;$$

$$\begin{cases} U\dot{x}\text{п}_k = U\dot{2}\text{п}_k \cdot \mathrm{ch}[\underline{\gamma}_k \cdot (l-x)] - \\ \quad - I\dot{2}\text{д}_k \cdot \underline{ZB}_k \cdot \mathrm{sh}[\underline{\gamma}_k \cdot (l-x)] \\ I\dot{x}\text{п}_k = \dfrac{U\dot{2}\text{п}_k}{\underline{ZB}_k} \cdot \mathrm{sh}[\underline{\gamma}_k \cdot (l-x)] - \\ \quad - I\dot{2}\text{д}_k \cdot \mathrm{ch}[\underline{\gamma}_k \cdot (l-x)] \end{cases}. \quad (32)$$

По формулам (23, 32) и (25) определяем числовые значения напряжения и тока на расстоянии $x$ от начала линии в моменты времени $t=t_q$.

Если зафиксировать координату $x$ от 0 до $l$, то по выше приведенным формулам можно численно рассчитать изменение во времени $t$ напряжения и тока в линии. Для этого разработан алгоритм вычислений с использованием системы Mathcad и проведены расчеты напряжений и токов переходного процесса в воздушной линии электропередачи для четырех рассмотренных вариантов (п. 1–4) при следующих параметрах [3, 5]: $Em$=200 кВ; $\theta=\pi/2$; $\tau$=5 мс; $l$=289,7 км; $t0$=1 мс; $n$=5; $R0$=0,12 Ом/км; $L0=1,36\cdot10^{-3}$ Гн/км; $G0=9,71\cdot10^{-9}$ См/км; $C0=8,597\cdot10^{-9}$ Ф/км; $V0=2,897\cdot10^{5}$ км/с; $R2=10R1$=100 Ом; $L2=10L1$=2 Гн; $C1=10C2$=5 мкФ.

На рис. 2 и 3 приведены примеры расчетных зависимостей при замыкании ключа $K1$ (п. 1).

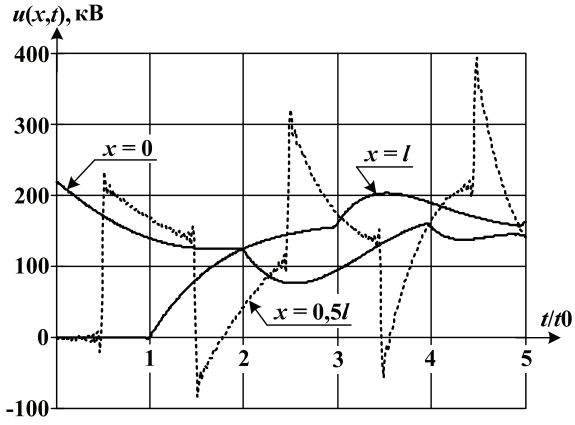


***Рис. 2.*** *Расчетные зависимости для напряжений в линии*

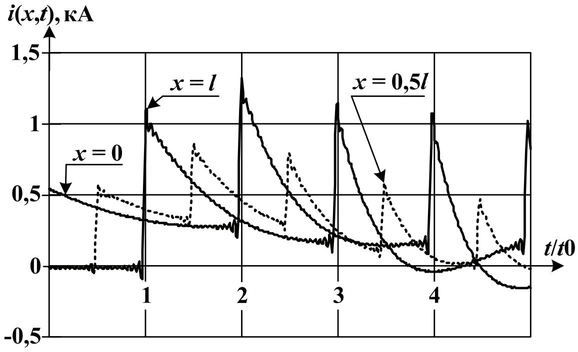


***Рис. 3.*** *Расчетные зависимости для токов в линии*

В конце линии получили напряжение $u(l,t0)=0$ (рис. 2) и ток $i(l,t0)\approx 2i(0,0)$ (рис. 3), что соответствует первому моменту прихода падающих волн напряжения и тока в нагрузку, когда емкость $C2$ 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 линии электропередачи при подключении и отключении источника и нагрузки. Показано, что частотный метод наиболее 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 и отражение этих волн от нагрузки и источника.
4. Результаты расчетов согласуются с теорией переходных процессов в однородных линиях при различных режимах: холостой ход, короткое замыкание, согласованная и несогласованная нагрузки.
5. Использование алгебраических уравнений в комплексной форме вместо дифференциальных уравнений существенно упрощает алгоритм вычислений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

*Поступила 01.03.2010 г.*