ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОНЛАЙН-ВЕРСИИ ПАКЕТА WOLFRAM MATHEMATICA ПРИ РАСЧЕТЕ ОТКЛИКА ЛЭЦ НА ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

А.Ф. Шиян 22.01.2015

Исследование переходного процесса возникающего в линейной электрической цепи (ЛЭЦ) в ответ на входное импульсное воздействие сложной формы (отклика электрической цепи на импульсное воздействие сложной формы) – задача трудоемкая, решаемая спектральным операторным или временн***ы***м методами.

Достаточно широкие возможности для расчета переходных процессов в линейных электрических цепях (ЛЭЦ) предоставляет пользователю пакет компьютерной алгебры WOLFRAM MATHEMATICA. Впрочем, данный пакет применяется студентами и курсантами МГТУ достаточно ограниченно: во-первых он дорог, во-вторых – ему есть достойные бесплатные альтернативы (в частности, пакет компьютерной математики SCILAB).

Однако в некоторых задачах, например, при вычислении интеграла Дюамеля, пока пакет WOLFRAM MATHEMATICA более удобен. Сегодня появилась бесплатная онлайн-версия этого продукта. Основатель и исполнительный директор фирмы Wolfram, Стивен Вольфрам, сообщил, что почти все особенности компьютерных приложений будут доступны в браузерной версии пакета WOLFRAM MATHEMATICA.

Проверим справедливость этого утверждения на примере решения конкретной задачи.

Рассчитаем временн***ы***м методом отклик тока конденсатора, включенного в ветвь ЛЭЦ, в ответ на входное импульсное воздействие сложной формы (рис. 1).

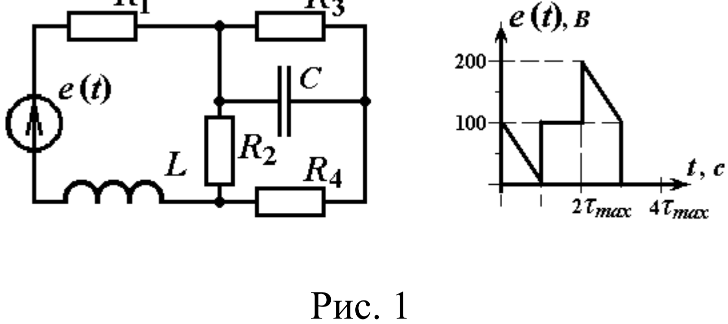


Рис. 1

Параметры элементов цепи известны: $\boldsymbol{R_1 = R_3}$ **= 100 Ом;** $\boldsymbol{L}$ **= 0,35 Гн;** $\boldsymbol{C}$ **= 30 мкФ;** $\boldsymbol{R_2 = R_4}$ **= 20 Ом;**

Решение.

1. Составим операторную схему замещения ЛЭЦ для расчета переходной проводимости

Для составления операторной схемы замещения исследуемой ЛЭЦ катушку и конденсатор исходной цепи заменяем их операторными изображениями для нулевых начальных условий, рис. 2. Катушку заменили операторным сопротивлением $\boldsymbol{Lp}$, конденсатор – операторным сопротивлением $1/C\boldsymbol{p}$.

Примем величину источника входного питания равной 1 В. В этом случае оригинал операторного изображения тока ветви с конденсатором будет равен переходной проводимости.

На операторной схеме система контуров выбрана таким образом, чтобы при расчете операторного тока конденсатора методом контурных токов, достаточно было найти лишь ток первого контура $\boldsymbol{I_{11}(p)}$, равный искомому $\boldsymbol{I_C(p)}$.

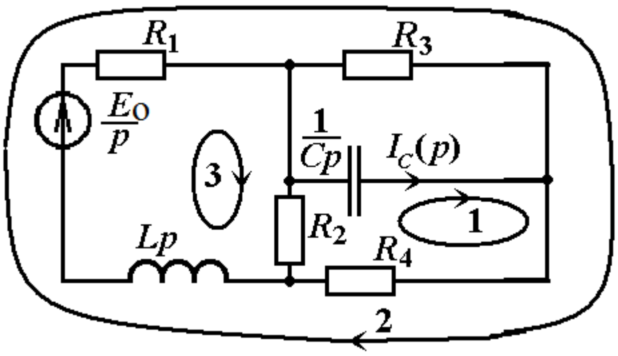


Рис. 2

2. Методом контурных токов рассчитаем операторное изображение тока конденсатора, для расчета передаточной функцию цепи по проводимости, и переходную проводимость

Для расчета операторного тока конденсатора $\boldsymbol{I_C(p)}$ методом контурных токов, составим систему контурных уравнений, соответствующих схеме цепи.

Все элементы полученной нами системы контурных токов являются операторными изображениями сопротивлений токов и ЭДС. Матричное уравнение, описывающее исследуемую цепь в соответствии с методом контурных токов, имеет следующий вид:

$$[Z_k][I_k] = [E_k],$$

где $[Z_k]$ – матрица контурных сопротивлений, ее коэффициенты:

$Z_{11} = R_2 + R_4 + 1/Cp$; $Z_{22} = R_1 + R_3 + R_4 + Lp$;

$Z_{33} = R_1 + R_2 + Lp$; $Z_{12} = Z_{21} = R_4$;

$Z_{13} = Z_{31} = – R_2$; $Z_{23} = Z_{32} = R_1 + Lp$;

$[I_k]$ – матрица операторных изображений контурных токов, ее элементы нам неизвестны. Первый элемент этой матрицы – операторное изображение тока первого контура мы должны найти.

$[E_k]$ – матрица операторных изображений контурных ЭДС, ее коэффициенты рассчитаем следующим образом:

$E_{11} = 0$; $E_{22} = E_{33} = E/p = 1/p$;

Используя пакет Mathematica[1] решим это матричное уравнение. Регистрация аккаунта на сайте с онлайн-версией пакета Wolfram Mathematica описана нами ранее, адрес этой публикации в Интернете http://af-toe-mgtu.ucoz.ru/index/online_versija_wolfram_mathematica/0-31.

Для решения задачи выходим на Интернет-страницу https://www.wolframcloud.com/, с которой, кликнув пиктограмму с надписью «**WOLFRAM *Mathematica* Online**», перейдем на страницу входа в свой аккаунт.

Открыв ячейку ввода в окне блокнота, введем программный код для решения нашей задачи, см. рис. 3.

[1] Иллюстрированный самоучитель по работе с пакетом Wolfram Mathematica находится по адресу http://samoucka.ru/document21804.html

В первых двух строках кода:

R1 = 100; R3 = 100; Lo = 0.35; Co = 30/1000000; R2 = 20;

R4 = 20; Eo = 1;

выполнен ввод числовых данных.

Следует обратить внимание на то, что многие заглавные символы алфавита зарезервированы пакетом Wolfram Mathematica в качестве служебных. Например, **I** – этим символом обозначается мнимая единица, **E** – основание натурального логарифма, и т.д. Поэтому мы усложняли символьные обозначения, например, ЭДС – **Eo**, индуктивность – **Lo.**

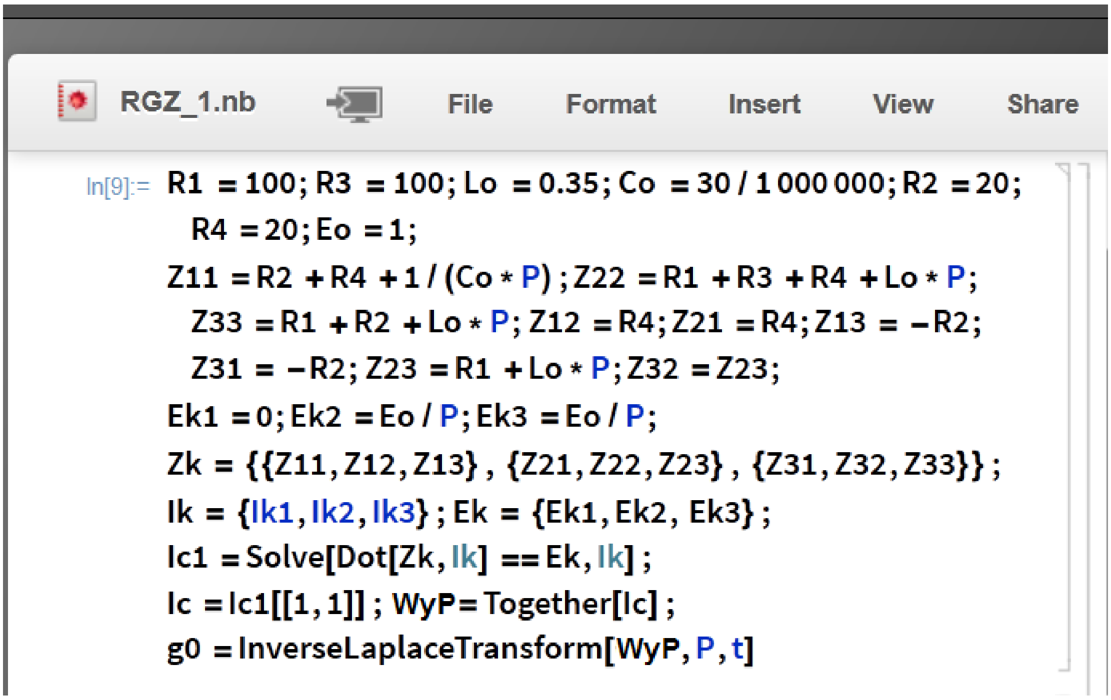


Рис. 3

В следующих трех строках кода:

Z11 = R2 + R4 + 1/(Co*P); Z22 = R1 + R3 + R4 + Lo*P;

Z33 = R1 + R2 + Lo*P;Z12 = R4; Z21 = R4; Z13 = -R2;

Z31 = -R2;Z23 = R1 + Lo*P; Z32 = Z23;

выполнен расчет коэффициентов матрицы контурных сопротивлений.

В шестой строке кода:

Ek1 = 0; Ek2 = Eo/P; Ek3 = Eo/P;

рассчитываются коэффициенты матрицы контурных ЭДС.

В седьмой и восьмой строках:

Zk = {{Z11, Z12, Z13}, {Z21, Z22, Z23}, {Z31, Z32, Z33}};

Ik = {Ik1, Ik2, Ik3};Ek = {Ek1, Ek2,Ek3};

объявлены матрицы контурных сопротивлений, контурных токов и контурных ЭДС:

В девятой строке:

Ic1 = Solve[Dot[Zk, Ik] == Ek, Ik];

переменной **Ic1** присваивается результат решения матричного уравнения. Команда **Solve** в этой строке вызывает подпрограмму решения. Параметрами этой команды является матричное уравнение и искомая матрица **Ik**. Команда **Dot** объявляет матричное умножение матриц **Zk** и **Ik**.

В десятой строке:

Ic = Ic1[[1, 1]]; WyP = Together[Ic]

переменной **Ic** присваивается операторное изображение первого контурного тока, т.к. в матрице **Ic1** он расположен в строке 1 и в столбце 1. Далее, переменной **WyP** присваивается операторное изображение первого контурного тока, приведенное командой **Together** к общему знаменателю.

Наконец в 11 строке:

g0 = InverseLaplaceTransform[WyP, P, t]

выполняется обратное преобразование по Лапласу и переменной **g0** присваивается оригинал – искомое значение переходной проводимости исследуемой цепи.

Для запуска командного кода на исполнение нажимаем клавишу «**Enter**» на цифровой клавиатуре или комбинацию клавиш «**Shift + Enter**» на основной клавиатуре. На рис. 4 показан результат исполнения командного кода.

Out[7]= $\mathrm{Ik1} \to \dfrac{1.42857}{390\,476. + 1\,480.95\,P + 1.\,P^2}$

Out[8]= $\mathrm{Ik1\ DiracDelta}[t] \to 1.42857\left(-0.00125857\, e^{-1\,137.75\,t} + 0.00125857\, e^{-343.199\,t}\right)$

Рис. 4

Таким образом, передаточная функция по проводимости имеет вид:

$$W_Y(p) = \frac{1{,}42857}{390476 + 1480{,}95\,p + p^2},$$

Соответственно, переходная проводимость цепи

$$g(t) = 1{,}42857\left(-0{,}00125857\,e^{-1137{,}75t} + 0{,}00125857\,e^{-343{,}199t}\right)$$

Чтобы раскрыть скобки полученного выражения дополним программный код командой **Expand[g0]**. Модифицированный программный код показан на рис. 5.

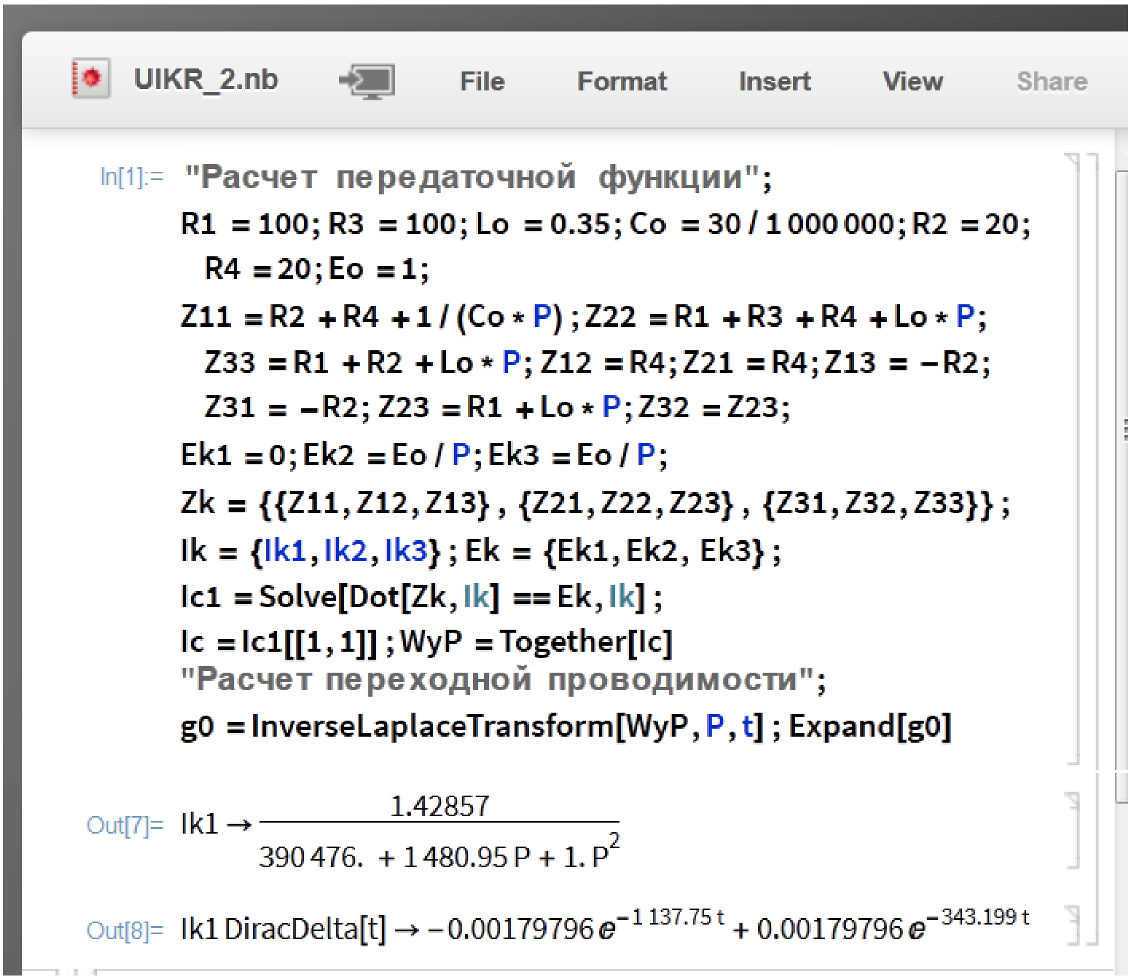


Рис. 5

Таким образом, выражение для переходной проводимости цепи:

$$g(t) = -\,0{,}00179796\,e^{-1137{,}75\,t} + 0{,}00179796\,e^{-343{,}199\,t};$$

3. Расчет отклика тока ветви с конденсатором методом интеграла Дюамеля

3.1. Исследование входного импульса. Деление его на однородные участки

Деление входного импульса на однородные участки выполняем таким образом (рис. 6), чтобы в пределах одного участка график функции $u(t)$ можно было представить простым аналитическим выражением:

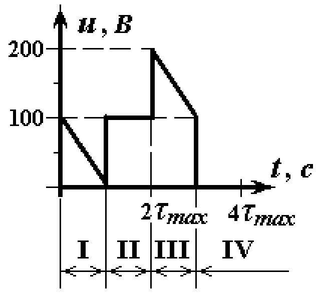


Рис. 6

- на первом участке входной импульс делает скачок на 100 В, а затем линейно снижается до 0 В;
- на втором участке входной импульс делает скачок на 100 В, а далее не меняет своего уровня;
- на третьем участке входной импульс делает скачок на 100 В, а затем линейно снижается с 200 до 100 В;
- на четвертом участке входной импульс скачком падает от 100 В до 0, чем входной импульс и завершается;
- продолжительность по времени каждого из трех первых участков: $\tau_{max} = -1/p_{min} = 1/343{,}199 \approx 0{,}00291376$ с ≈ 3 мс.

Примем $\tau_{max} = 0{,}003$ с.

3.2. Интеграл Дюамеля и отклик тока конденсатора на первом участке

Для первого участка интеграл Дюамеля для вычисления отклика тока в ветви с конденсатором имеет вид:

$$i_{\mathrm{I}}(t) = \Delta u_{\mathrm{I}}\, g(t) + \int_0^t u'_{\mathrm{I}} g(t-\theta)d\theta.$$

В этом уравнении Δu_{I} – скачок напряжения входного сигнала на первом участке,

$$\Delta u_{\mathrm{I}} = 100 \text{ В},$$

а u' – скорость изменения входного сигнала на этом участке, равна тангенсу угла наклона графика:

$$u_I' = \Delta u_I/\tau_{max} = -\ 100/0{,}003 \approx -\ 33333{,}3\ \text{В/с}.$$

Рассчитаем интеграл Дюамеля для первого участка в среде пакета Wolfram Mathematica Online. Запишем программный код решения этой задачи.

1. Откроем в блокноте своего аккаунта новую ячейку ввода и впишем в ее первой строке ремарку (рис. 7):

   "Расчет отклика тока на 1-м участке";

2. Объявим значения коэффициентов, характеризующих воздействующий сигнал на первом участке (**du1** – скачок входного сигнала в начале участка, **tau** – правая временн***а***я граница участка, **k1** - угловой коэффициент прямой графика для первого участка):

   du1=100;tau=0.003;k1=-du1/tau;

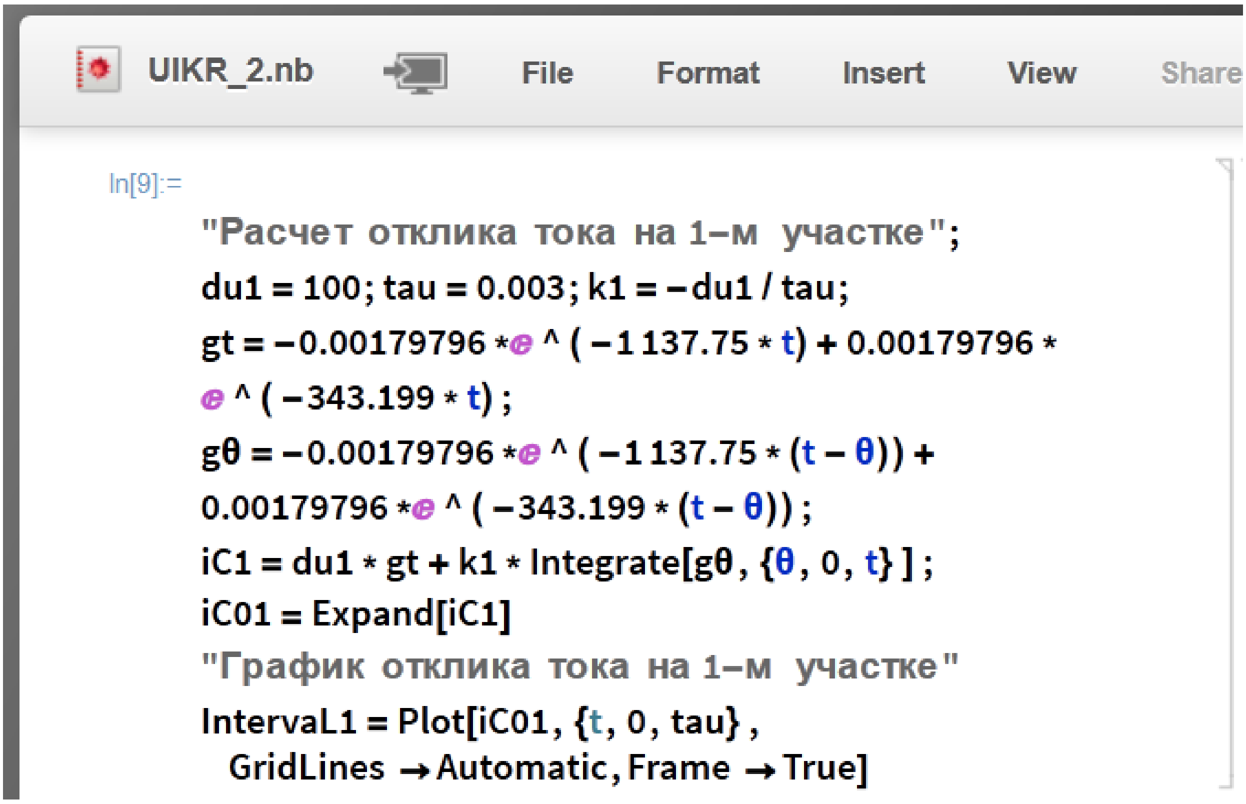


Рис. 7

3. Далее следует уравнение переходной проводимости **gt**:

   gt=-0.00179796*E^(-1137.75*t)+0.00179796*E^(-343.199*t);

где основание натурального логарифма можно вводить тремя способами:

- заглавной буквой **E**;
- командой **\[ExponentialE]**;
- кратковременно нажать клавишу **Esc**, вследствие чего в коде появится пунктирная вертикальная черта из трех точек, после нее нужно ввести последовательность **ee**, в результате откроется всплывающее окно с предложением выбрать красочный символ ***e***, который использован в нашем исходном коде, см. рис. 7. Аналогично вводится символ **θ**: после кратковременного нажатия клавиши **Esc**, нужно ввести символ **q**, и выбрать во всплывающем окне символ **θ**.

4. Запишем уравнение переходной проводимости **gθ** в виде, необходимом для интегрирования по промежуточной переменной **θ**:

   gθ=-0.00179796*E^(-1137.75*(t-θ))+0.00179796*E^(-343.199*(t-θ));

5. Запишем код для вычисления отклика тока с помощью интеграла Дюамеля:

   iC1=du1*gt+k1*Integrate[gϑ,{ θ,0,t}];

6. Оптимизируем выражение отклика тока. С помощью команды **Together** мы запускаем подпрограмму приведение выражения к общему знаменателю. Команда **Expand** обеспечивает раскрытие скобок.

   iC01=Expand[Together[iC1]]

7. Перед выводом графика выводим на экран сообщение с названием графика:

   "График отклика тока на 1-м участке"

8. Переменной **IntervaL1** присваиваем программный код вывода графика отклика тока на первом участке: командой **Plot** выводим график функции **iC01** в диапазоне изменения времени **t** от 0 до **tau**:

   IntervaL1=Plot[iC01,{t,0,tau},GridLines -> Automatic, Frame -> True]

Параметры **GridLines -> Automatic, Frame -> True** обеспечивают вывод координатной сетки и автоматический выбор размеров графического окна.

На рис. 8 показан результат исполнения программного кода

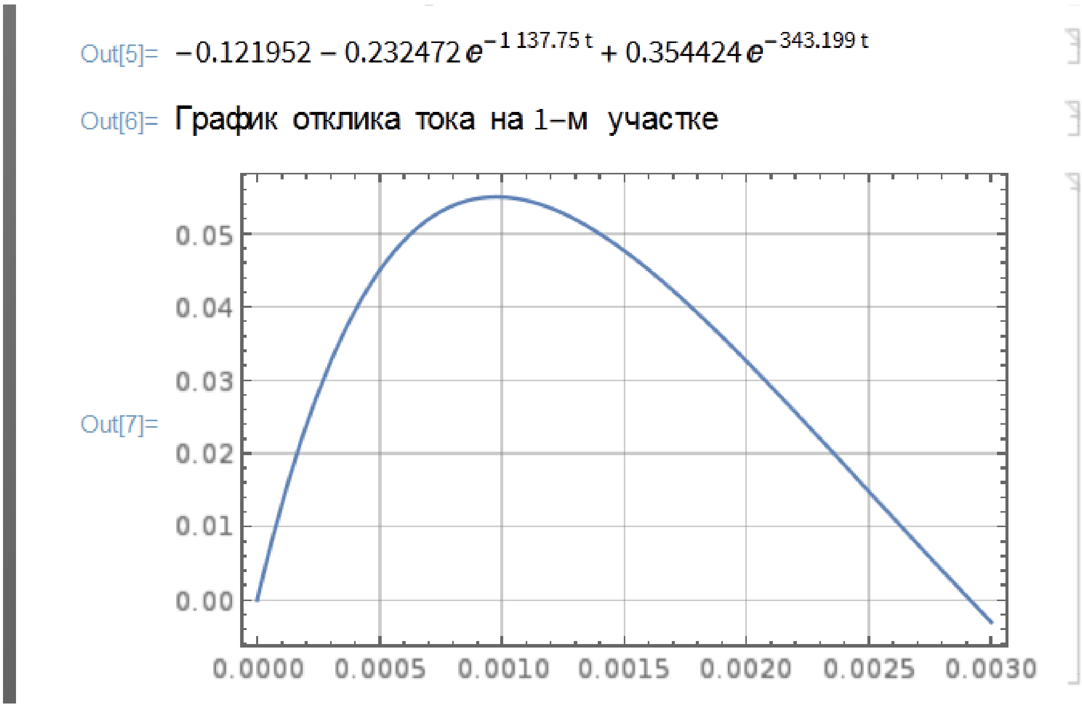


Рис. 8

Полученное для отклика тока конденсатора на первом участке выражение имеет вид:

$$i_{\mathrm{I}}(t) = -\,0{,}121952 - 0{,}232472\, e^{-1137{,}75t} + 0{,}354424\, e^{-343{,}199t}.$$

3.3. Интеграл Дюамеля и отклик тока конденсатора на втором участке

Для второго участка интеграл Дюамеля для вычисления отклика тока в ветви с конденсатором имеет вид:

$$i_{\mathrm{II}}(t) = \Delta u_{\mathrm{I}}\, g(t) + \int_0^{\tau} u'_{\mathrm{I}} g(t-\theta)d\theta + \Delta u_{\mathrm{II}}\, g(t-\tau) + \int_0^{t} u'_{\mathrm{II}} g(t-\theta)d\theta.$$

В этом уравнении Δu_{II} – скачок напряжения входного сигнала на втором участке,

$$\Delta u_{\mathrm{II}} = 100\ \text{В},$$

а u'_{II} – скорость изменения входного сигнала на этом участке, равная тангенсу угла наклона графика:

$$u'_{\mathrm{II}} = \Delta u_{\mathrm{II}}/\tau_{max} = 0/0{,}003 = 0 \text{ В/с}.$$

После подстановки, получаем

$$i_{\mathrm{I}}(t) = 100(-\,0{,}00179796\,e^{-1137{,}75t} + 0{,}00179796\,e^{-343{,}199t}) -$$

$$-\,33333{,}3\times 0{,}00179796\int_0^{\tau}(-e^{-1137{,}75(t-\theta)} + e^{-343{,}199(t-\theta)})d\theta \;+$$

$$+\,100(-\,0{,}00179796\,e^{-1137{,}75(t-\theta)} + 0{,}00179796\,e^{-343{,}199(t-\theta)}).$$

Программный код решения этой задачи в среде пакета Wolfram Mathematica Online создается аналогично коду, который мы разрабатывали для первого участка:

```
"Расчет отклика тока на 2-м участке";
du1=100; tau=0.003; k1=-du1/tau; du2=100;
gt=-0.00179796*E^(-1137.75*t) + 0.00179796*E^(-343.199*t);
gt2=-0.00179796*E^(-1137.75*(t-tau)) + 0.00179796*E^(-343.199*(t-tau));
gθ = -0.00179796*E^(-1137.75*(t-θ))  + 0.00179796*E^(-343.199*(t-θ));
iC2=du1*gt+k1*Integrate[gθ,{θ,0,tau}]+du2*gt2;
iC02=Expand[Together[iC2]]
"График отклика тока на 2-м участке"
IntervaL2=Plot[iC02,{t,tau,2*tau},GridLines -> Automatic, Frame -> True]
```

Для создания этого кода мы открыли в блокноте новую ячейку ввода и скопировали в нее содержимое предыдущей ячейки – код для расчета отклика тока на 1-м участке. Далее мы модифицировали этот код:

- изменили номер участка в ремарках;
- дописали в исходные данные «**du2=100;**» – значение величины скачка напряжения в начале второго участка;

- поменяли обозначение **gt1** на **gt2**, а в выражении для **gt2** мы время **t** заменили на выражение (**t - tau**);
- поменяли обозначение **iC1** на **iC2**, а в выражении для **iC2** мы заменили верхний предел интегрирования: вместо переменной **t** мы поставили числовую границу **tau**. Кроме этого, мы дополнили **iC2** откликом на скачок напряжения **du2*gt2**.

На рис. 9 приведен скриншот окна программы с программным кодом и результатами его исполнения.

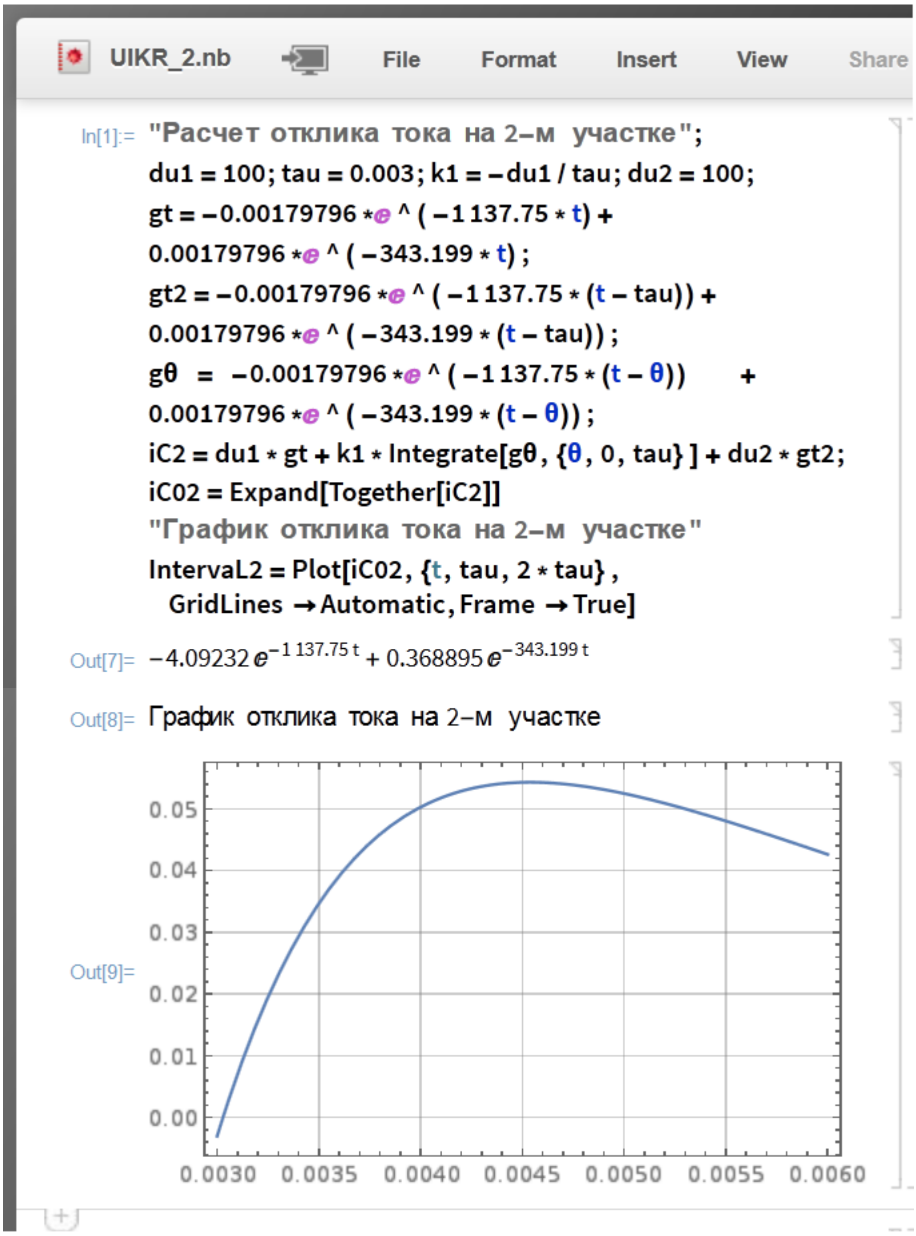


Рис. 9.

Выражение, полученное для отклика тока конденсатора на втором участке, имеет вид:

$$i_{\text{II}}(t) = -4{,}09232\, e^{-1137{,}75t} + 0{,}368895\, e^{-343{,}199t}.$$

3.4. Интеграл Дюамеля и отклик тока конденсатора на третьем участке

Для третьего участка интеграл Дюамеля для вычисления отклика тока в ветви с конденсатором имеет вид:

$$i_{\text{III}}(t) = \Delta u_{\text{I}}\, g(t) + \int_0^{\tau} u'_{\text{I}} g(t-\theta)d\theta + \Delta u_{\text{II}}\, g(t-\tau) + \Delta u_{\text{III}}\, g(t-2\tau) + \int_{2\tau}^{t} u'_{\text{III}} g(t-\theta)d\theta.$$

В этом уравнении Δu_{III} – скачок напряжения входного сигнала на втором участке,

$$\Delta u_{\text{III}} = 100 \text{ В},$$

а u'_{III} – скорость изменения входного сигнала на этом участке, равная тангенсу угла наклона графика:

$$u'_{\text{III}} = \Delta u_{\text{III}}/\tau_{\max} = -100/0{,}003 \approx -33333{,}3 \text{ В/с}.$$

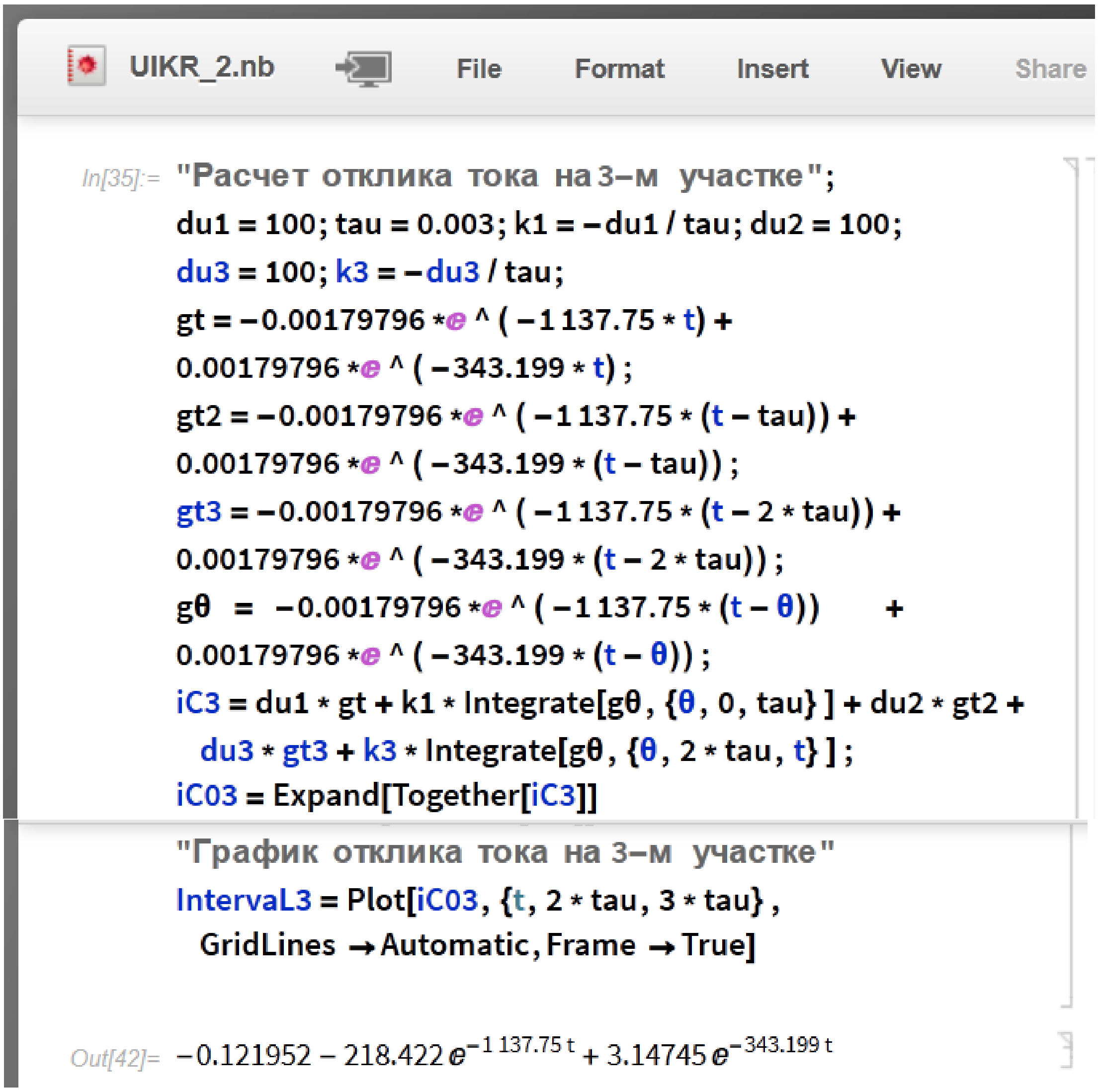
После подстановки, получаем

$$\begin{aligned} i_{\text{III}}(t) &= 100(-0{,}00179796\, e^{-1137{,}75t} + 0{,}00179796\, e^{-343{,}199t}) - \\ &- 33333{,}3 \times 0{,}00179796 \int_0^{\tau} (-e^{-1137{,}75(t-\theta)} + e^{-343{,}199(t-\theta)})d\theta + \\ &+ 100(-0{,}00179796\, e^{-1137{,}75(t-\theta)} + 0{,}00179796\, e^{-343{,}199(t-\theta)}) + \\ &+ 100(-0{,}00179796\, e^{-1137{,}75(t-2\theta)} + 0{,}00179796\, e^{-343{,}199(t-2\theta)}) - \\ &- 33333{,}3 \times 0{,}00179796 \int_{2\tau}^{t} (-e^{-1137{,}75(t-\theta)} + e^{-343{,}199(t-\theta)})d\theta. \end{aligned}$$

Программный код решения этой задачи в среде пакета Wolfram Mathematica Online создается аналогично коду, который мы разрабатывали для первого и второго участков, см. рис. 10.

```
"Расчет отклика тока на 3-м участке";
du1=100;tau=0.003;k1=-du1/tau;du2=100;
du3=100;k3=-du3/tau;
```

```
gt=-0.00179796*E^(-1137.75*t)+ 0.00179796*E^(-343.199*t);
gt2=-0.00179796*E^(-1137.75*(t-tau))+ 0.00179796*E^(-343.199*(t-tau));
gt3=-0.00179796*E^(-1137.75*(t-2*tau))+ 0.00179796*E^(-343.199*(t-2*tau));
gθ = -0.00179796*E^(-1137.75*(t-θ)) + 0.00179796*E^(-343.199*(t-θ));
iC3=du1*gt+k1*Integrate[gθ,{θ,0,tau}]+du2*gt2+du3*gt3+
k3*Integrate[gθ,{ θ,2*tau,t}];
iC03=Expand[Together[iC3]]
"График отклика тока на 3-м участке"
IntervaL3=Plot[iC03,{t,2*tau,3*tau}, GridLines -> Automatic,Frame -> True]
```



UIKR_2.nb File Format Insert View Share

```
In[35]:= "Расчет отклика тока на 3-м участке";
du1 = 100; tau = 0.003; k1 = -du1 / tau; du2 = 100;
du3 = 100; k3 = -du3 / tau;
gt = -0.00179796 *e ^ ( -1 137.75 * t) +
0.00179796 *e ^ ( -343.199 * t) ;
gt2 = -0.00179796 *e ^ ( -1 137.75 * (t - tau)) +
0.00179796 *e ^ ( -343.199 * (t - tau)) ;
gt3 = -0.00179796 *e ^ ( -1 137.75 * (t - 2 * tau)) +
0.00179796 *e ^ ( -343.199 * (t - 2 * tau)) ;
gθ = -0.00179796 *e ^ ( -1 137.75 * (t - θ)) +
0.00179796 *e ^ ( -343.199 * (t - θ)) ;
iC3 = du1 * gt + k1 * Integrate[gθ, {θ, 0, tau} ] + du2 * gt2 +
  du3 * gt3 + k3 * Integrate[gθ, {θ, 2 * tau, t} ] ;
iC03 = Expand[Together[iC3]]
"График отклика тока на 3-м участке"
IntervaL3 = Plot[iC03, {t, 2 * tau, 3 * tau} ,
  GridLines → Automatic, Frame → True]
```

Out[42]= $-0.121952 - 218.422\, e^{-1137.75\, t} + 3.14745\, e^{-343.199\, t}$

Рис. 10

На рис.11 приведен скриншот окна с графиком отклика тока на третьем участке.

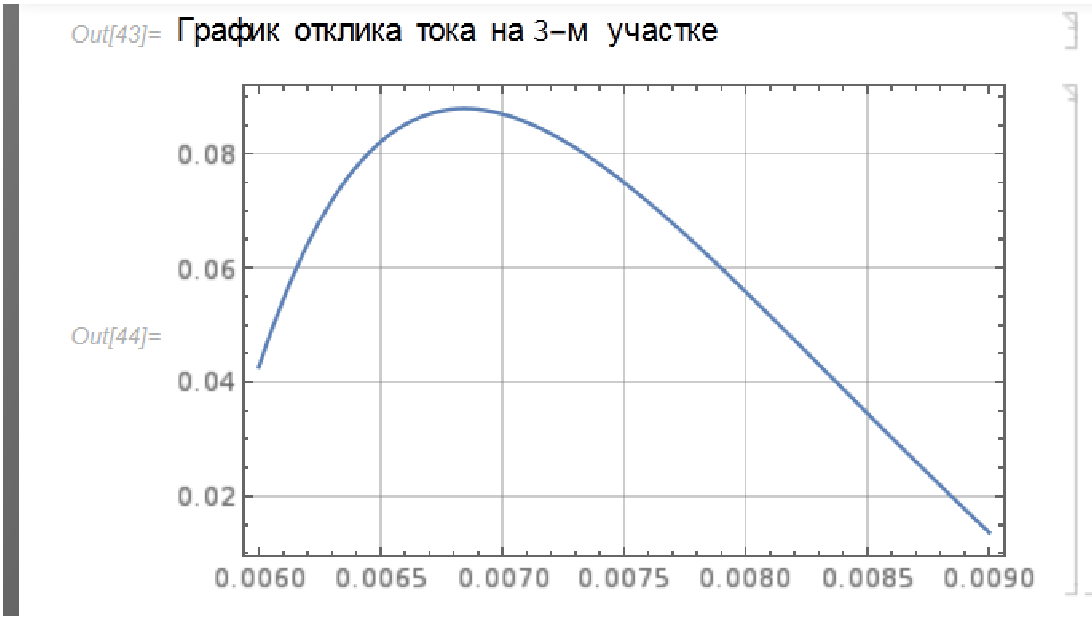


Рис. 11.

Выражение, полученное для отклика тока конденсатора на третьем участке, имеет вид:

$$i_{\mathrm{III}}\,(t) = -\,0{,}121952 - 218{,}422\, e^{-1137{,}75t} + 3{,}14745\, e^{-343{,}199t}.$$

3.5. Интеграл Дюамеля и отклик тока конденсатора на четвертом участке

Для четвертого участка интеграл Дюамеля для вычисления отклика тока в ветви с конденсатором имеет вид:

$$i_{\mathrm{III}}\,(t) = \Delta u_{\mathrm{I}}\, g(t) + \int_0^{\tau} u'_{\mathrm{I}} g(t-\theta)d\theta + \Delta u_{\mathrm{II}}\, g(t-\tau) + \Delta u_{\mathrm{III}}\, g(t-2\tau) +$$

$$+ \int_{2\tau}^{3\tau} u'_{\mathrm{III}} g(t-\theta)d\theta + \Delta u_{\mathrm{IV}}\, g(t-4\tau)$$

В этом уравнении Δu_{III} – скачок напряжения входного сигнала на втором участке,

$$\Delta u_{\mathrm{IV}} = -\,100\ \text{В},$$

а u'_{IV} – скорость изменения входного сигнала на этом участке, равна нулю.

После подстановки, получаем

$$i_{\mathrm{IV}}(t) = 100\,(-\,0{,}00179796\,e^{-1137{,}75t} + 0{,}00179796\,e^{-343{,}199t}) -$$

$$-\,33333{,}3\times 0{,}00179796\int_0^{\tau}(-e^{-1137{,}75(t-\theta)} + e^{-343{,}199(t-\theta)})d\theta\ +$$

$$+\,100\,(-\,0{,}00179796\,e^{-1137{,}75(t-\tau)} + 0{,}00179796\,e^{-343{,}199(t-\tau)}) +$$

$$+\,100\,(-\,0{,}00179796\,e^{-1137{,}75(t-2\tau)} + 0{,}00179796\,e^{-343{,}199(t-2\tau)}) -$$

$$-\,33333{,}3\times 0{,}00179796\int_{2\tau}^{3\tau}(-e^{-1137{,}75(t-\theta)} + e^{-343{,}199(t-\theta)})d\theta$$

$$-\,100\,(-\,0{,}00179796\,e^{-1137{,}75(t-3\tau)} + 0{,}00179796\,e^{-343{,}199(t-3\tau)})$$

Программный код решения этой задачи в среде пакета Wolfram Mathematica Online создается совершенно аналогично кодам предыдущих участков, см. рис. 12.

```
"Расчет отклика тока на 4-м участке";
du1=100;tau=0.003;k1=-du1/tau;du2=100;du3=100;
k3=-du3/tau;du4=-100;
gt=-0.00179796*E^(-1137.75*t)+0.00179796*E^(-343.199*t);
gt2=-0.00179796*E^(-1137.75*(t-tau))+0.00179796*E^(-343.199*(t-tau));
gt3=-0.00179796*E^(-1137.75*(t-2*tau))+0.00179796*E^(-343.199*(t-2*tau));
gt4=-0.00179796*E^(-1137.75*(t-3*tau))+0.00179796*E^(-343.199*(t-3*tau));
gθ = -0.00179796*E^(-1137.75*(t-θ)) + 0.00179796*E^(-343.199*(t-θ));
iC4=du1*gt+k1*Integrate[gθ,{ θ,0,tau}] + du2*gt2 + du3*gt3 +
k3*Integrate[gθ,{ θ,2*tau,3*tau}] + du4*gt4;
iC04=Expand[Together[iC4]]
"График отклика тока на 4-м участке"
IntervaL4=Plot[iC04,{t,3*tau,8*tau},GridLines -> Automatic, Frame -> True]
"График отклика тока на участках с 1 по 4"
Show[IntervaL1,IntervaL2,IntervaL3,IntervaL4,PlotRange-> Automatic]
```

```
UIKR_2.nb   File   Format   Insert   View   Share

In[1]:= "Расчет отклика тока на 4−м участке";
du1 = 100; tau = 0.003; k1 = −du1 / tau; du2 = 100; du3 = 100
  ; k3 = −du3 / tau; du4 = −100;
gt = −0.00179796 *ℯ ^ ( −1 137.75 * t) + 0.00179796 *ℯ ^ ( −
    343.199 * t) ;
gt2 = −0.00179796 *ℯ ^ ( −1 137.75 * (t − tau)) + 0.00179796 *
  ℯ ^ ( −343.199 * (t − tau)) ;
gt3 = −0.00179796 *ℯ ^ ( −1 137.75 * (t − 2 * tau)) + 0.0017979
  6 *ℯ ^ ( −343.199 * (t − 2 * tau)) ;
gt4 = −0.00179796 *ℯ ^ ( −1 137.75 * (t − 3 * tau)) + 0.0017979
  6 *ℯ ^ ( −343.199 * (t − 3 * tau)) ;
gθ  =  −0.00179796 *ℯ ^ ( −1 137.75 * (t − θ))    +   0.001
  79796 *ℯ ^ ( −343.199 * (t − θ)) ;
iC4 = du1 * gt + k1 * Integrate[gθ, {θ, 0, tau} ] + du2 * gt2 +
  du3 * gt3 + k3 * Integrate[gθ, {θ, 2 * tau, 3 * tau} ] + du4 *
  gt4;
iC04 = Expand[Together[iC4]]
"График отклика тока на 4−м участке"
IntervaL4 = Plot[iC04, {t, 3 * tau, 8 * tau} , GridLines → Auto
    matic, Frame → True]
"График отклика тока на участках с 1 по 4"
Show[IntervaL1, IntervaL2, IntervaL3, IntervaL4, PlotRange
    → Automatic]

Out[67]= 6 289.43 ℯ^(−1 137.75 t) − 4.63233 ℯ^(−343.199 t)

Out[68]= График отклика тока на 4−м участке

Out[69]=
```

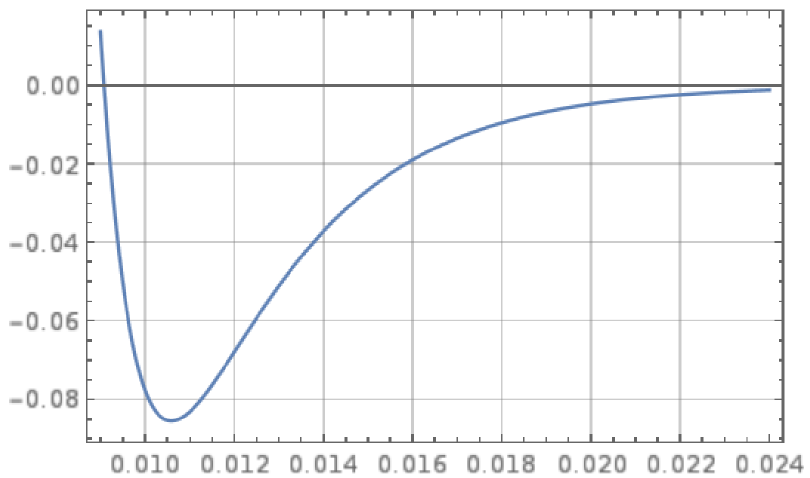


Рис. 12

Выражение, полученное для отклика тока конденсатора на четвертом участке, имеет вид:

$$i_{\text{IV}}(t) = 6289{,}43\, e^{-1137{,}75t} - 4{,}63233 e^{-343{,}199t}.$$

Последняя строка кода склеивает графики всех четырех участков:

```
"График отклика тока на участках с 1 по 4"
Show[IntervaL1,IntervaL2,IntervaL3,IntervaL4,PlotRange-> Automatic]
```

Результат склеивания графиков всех четырех участков представлен на рис. 13.

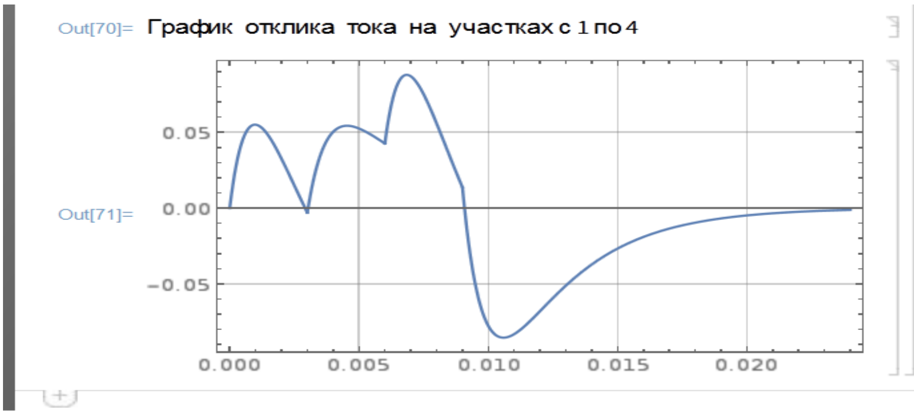


Рис. 13

Сравнивая этот график с тем, что дает компьютерное симулирование в среде Qucs, см. рис. 14, убеждаемся в том, что результаты одинаковы.

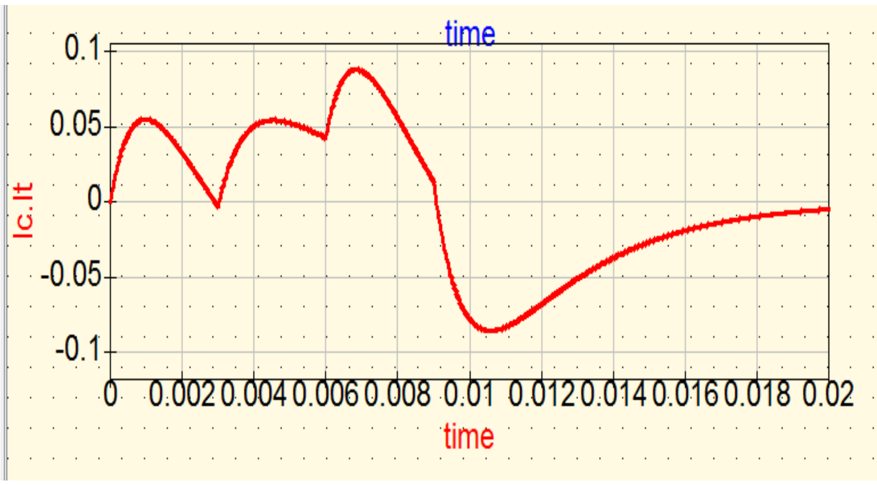


Рис. 14

На рис. 15 приведена Qucs-модель исследуемой цепи и результаты моделирования.

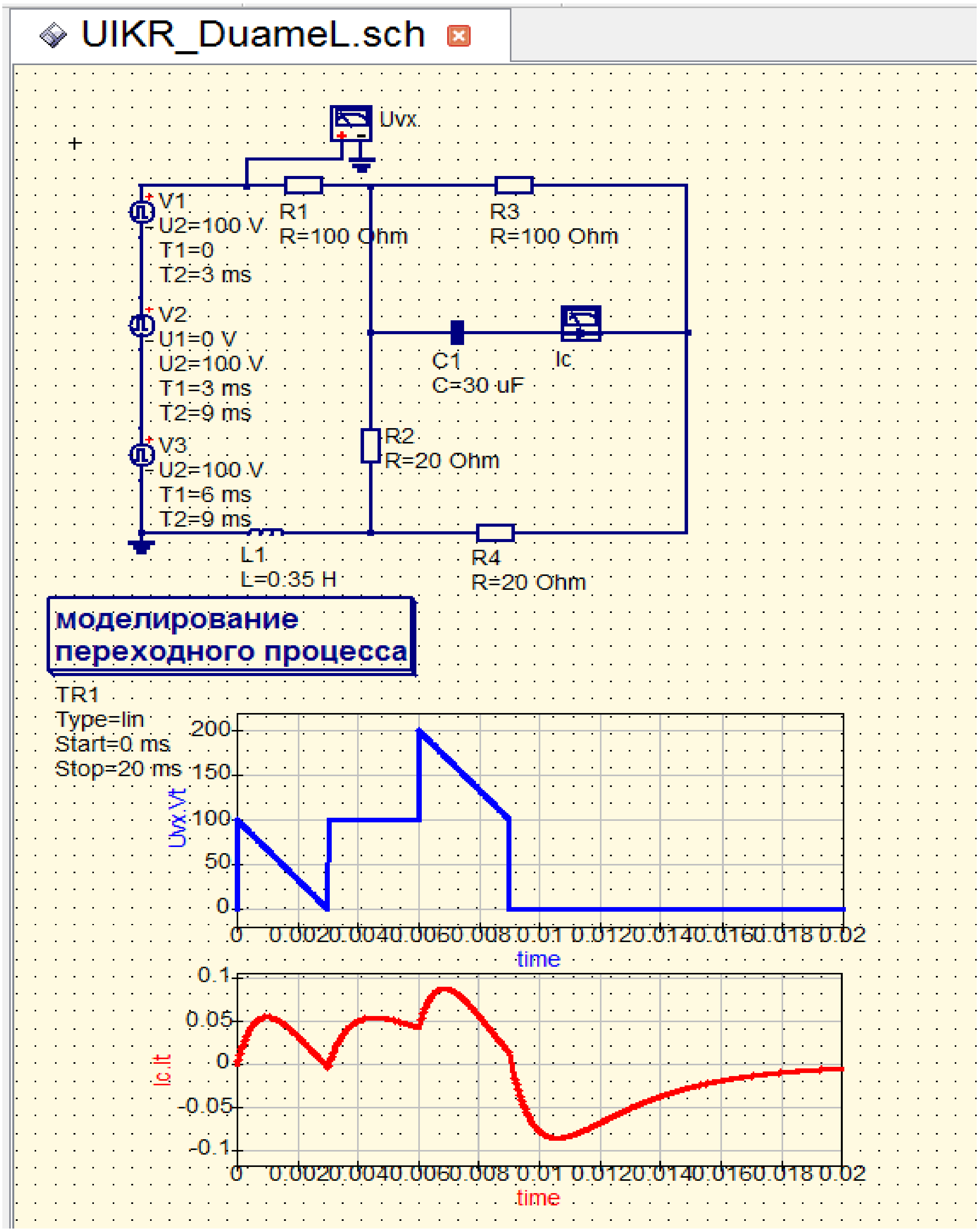


Рис. 15

Проведенное исследование наглядно проиллюстрировало достоинства пакета Wolfram Mathematica Online и его возможности при исследовании импульсных воздействий на электрические цепи.

Следует иметь ввиду, что Online-сервисы иногда могут быть недоступны. Например, в процессе данного исследования появилось сообщение, приведенное на рис. 16, о том, что сервер, вследствие неожиданных проблем, не может обработать ваш запрос. Пожалуйста, попробуйте еще через несколько минут.

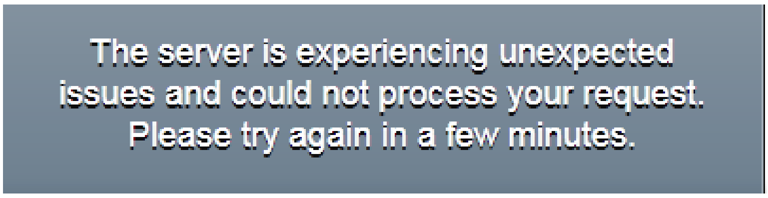


Рис. 16

Однако, это случается редко. Впрочем, это возникает при эксплуатации любого облачного приложения.