

## ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ВЛИЯЮЩИЕ НА РАБОТУ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

**Петлеванная Е.В., студентка; Левшов А.В., проф., к.т.н.**

*(ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина)*

**Введение.** В современном мире, чрезвычайно актуален вопрос «зеленой энергетики». Делегаты Второго комитета 67-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН приняли резолюцию об объявлении 2014–2024 годов Десятилетием устойчивой энергетики для всех. В резолюции «Содействие расширению использования новых и возобновляемых источников энергии» отмечается, что в настоящее время доля новых и возобновляемых источников энергии в мировом энергетическом балансе все еще невелика в силу, среди прочего, высокой стоимости соответствующих технологий. Генеральная Ассамблея ООН рекомендовала правительствам создавать благоприятные условия для популяризации и использования новых и возобновляемых источников энергии и более эффективного энергопотребления [1].

Ограниченность доступных ресурсов «традиционных» источников энергии, а также экологические проблемы их использования, позволяют судить о безусловной перспективности возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в ближайшем будущем. Одним из факторов, сдерживающих использования зеленой энергии, является более высокая стоимость конечной энергии, полученной на базе ВИЭ, по сравнению с традиционной энергией. Одним из наиболее повсеместно доступных и перспективных ВИЭ является солнечная энергетика, позволяющая электрифицировать отдельные удаленные от электрических сетей объекты. Возможное решение по электроснабжению таких объектов представляется в виде использования фотоэлектрических модулей (ФЭМ). Однако в каждом конкретном случае необходимо технико-экономическое обоснование использования ФЭМ.

### **Материалы и результат исследования.**

На всю поверхность Земли приходится около  $(0,85 - 1,2) \times 10^{14}$  кВт или  $(7,5 - 10) \times 10^{17}$  кВт·ч/год солнечного излучения (СИ). Средняя удельная величина СИ 250 Вт/м<sup>2</sup> или 1752-2190 кВт·ч/м<sup>2</sup>·год. При этом диапазон удельного прихода СИ на Землю меняется от 170 до 1000 Вт/м<sup>2</sup> или  $(17 - 100) \times 10^4$  кВт·ч/км<sup>2</sup> в зависимости от региона. Искусственные источники энергии, созданные человеком обеспечивают до 19 кВт/км<sup>2</sup>, что говорит об огромных возможностях СИ для удовлетворения потребностей человечества. Применительно к условиям Украины интенсивность СИ для различных её регионов (рис. 1).

Основными факторами, влияющими на работу фотоэлектрического модуля является: интенсивность излучения, ориентация панели, температура окружающей среды, затемнение.

Ориентация панели ФЭМ имеет весомое значение, так как количество солнечной энергии, поступающей на приемную площадку, определится соотношением

$$R(t) = R_{np}(t) \cdot \cos \vartheta^\circ(t), \quad (1)$$

где  $R$  – интенсивность потока солнечного излучения на 1 м<sup>2</sup> приемной площадки (Вт/м<sup>2</sup>);

$R_{np}$  – прямая мощность солнечного излучения (Вт/м<sup>2</sup>);

$\vartheta^\circ$  – угол падения солнечного излучения по отношению к плоскости ФЭМ (град).

Для оценки влияния угла установки ФЭМ, рассмотрим случаи горизонтальной и наклонной приемной площадки на (рис. 2).

Расчетный угол падения СИ

$$\vartheta = \theta_z - \beta, \quad (2)$$

где  $\theta_z^\circ$  - угол между направлением на солнце и вертикалью (зенитный угол);

$\beta$  – угол наклона приемной площадки по отношению к горизонту:

$$\text{В случае а) } \beta=0, \text{ т.е. } \mathcal{G}_a = \theta_z - \beta_a = \theta_z \quad (3)$$

$$\text{В случае б) } \beta>0, \text{ т.е. } \mathcal{G}_a = \theta_z - \beta_a \quad (4)$$

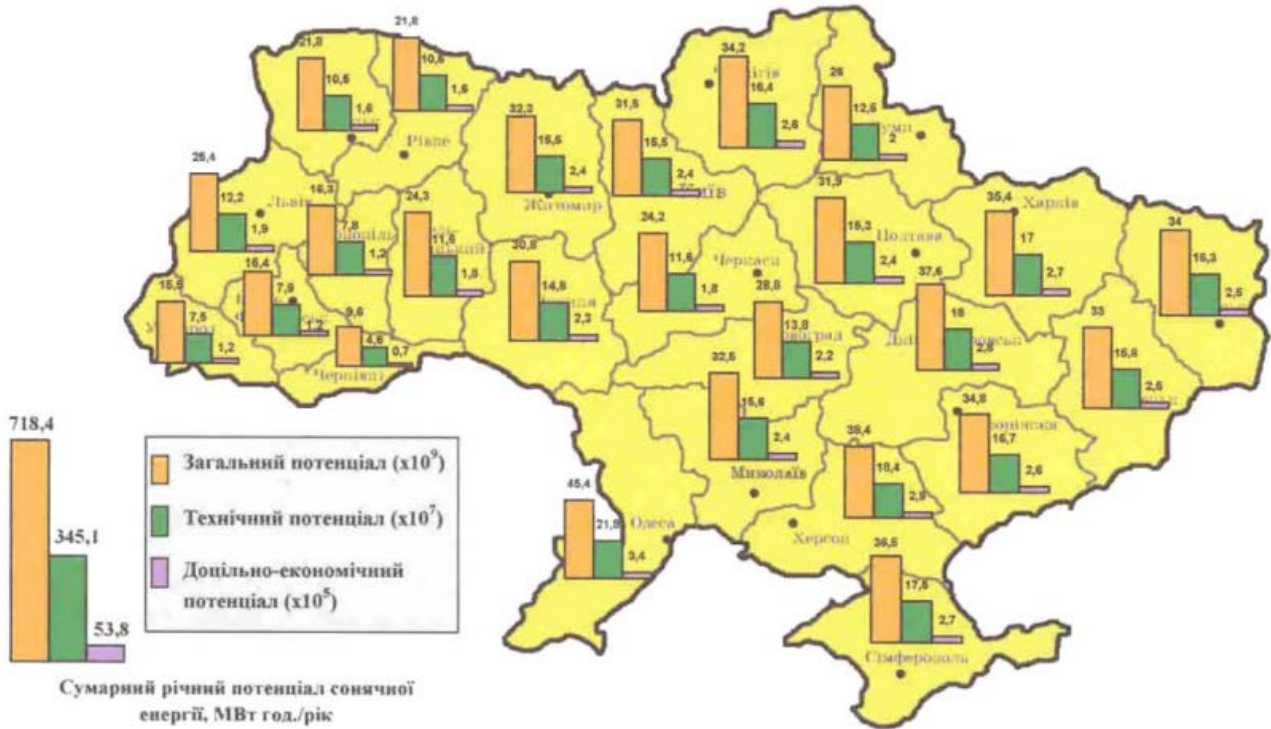


Рисунок 1 – Потенциал солнечной энергии на территории Украины [2]

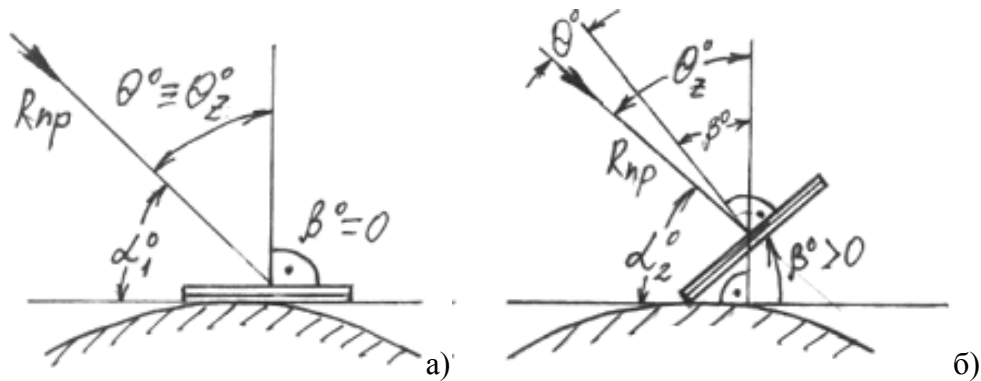


Рисунок 2 – Соотношение  $\theta^\circ$  и  $\theta_z^\circ$  для: а - горизонтальной приемной площадки, б - наклонной приемной площадки,  $\alpha$  – высота (угол)солнца над горизонтом ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ) [3]

Очевидно,  $\mathcal{G}_a > \mathcal{G}_b$  на величину наклона  $\beta$  ФЭМ. Из этого следует, что в случае б)  $R(t)_b > R(t)_a$ .

Моделирование влияния теней произвольной формы на характеристики солнечных батарей (СБ) дает возможность оценить потери мощности при различных вариантах затенения. При частичном затенении одиночного элемента или их группы происходит снижение выходной мощности СБ вследствие уменьшения поступающей в элемент световой энергии и увеличения внутренних потерь энергии в неосвещенной части элемента.

В [4] показана положительная роль шунтирующих диодов, они предохраняющих работу батареи, когда один из элементов полностью затенен (рис. 3).

Как и другие полупроводниковые приборы СЭ чувствительны к изменению температуры [5]. Параметром, наиболее подверженным изменению температуры, является напряжение холостого хода. Влияние увеличения температуры показано на следующем графике (рис.4).

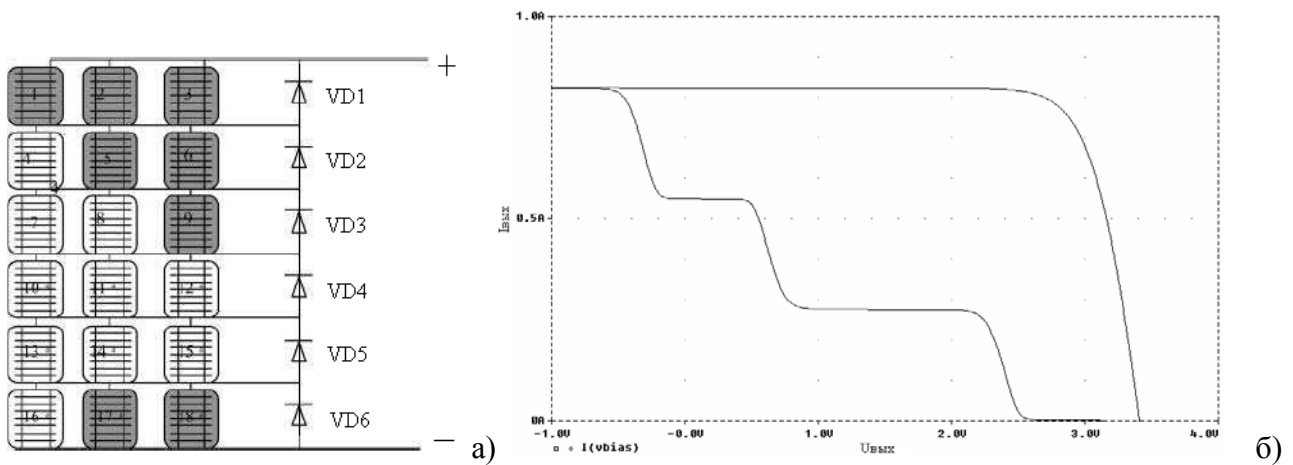


Рисунок 3 – Моделирование затенения СБ:

а – СБ из 18 СЭ с затененными фотоэлементами и шунтирующими диодами, б - сравнение ВАХ частично затененной и не затененной батареи [4]

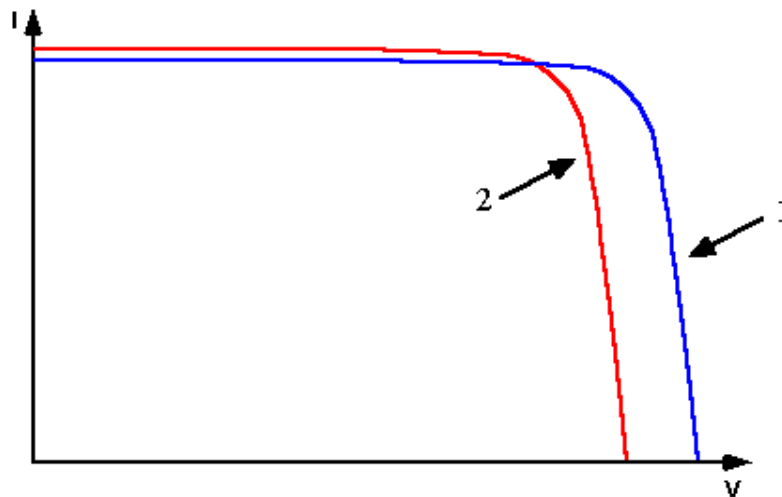


Рисунок 4 - Влияние температуры на вольт-амперную характеристику (ВАХ) СЭ: 1 – ВАХ при нормальной температуре в 300 К, 2 – ВАХ при повышенной температуре

Напряжение холостого хода уменьшается с увеличением температуры из-за зависимости от  $I_0$  – тока холостого хода. Уравнение для  $I_0$  на одной из сторон СЭ записывается, как:

$$I_0 = qA \frac{Dn_i^2}{LN_D}, \quad (5)$$

где  $q$  - заряд электрона;  
 $D$  - коэффициент диффузии неосновных носителей;  
 $L$  - диффузионная длина неосновных носителей;  
 $N_D$  - коэффициент легирования;  
 $n_i$  - собственная концентрация носителей.

Многие из членов, входящих в это уравнение, зависят от температуры, но наиболее сильно эта зависимость проявляется для собственной концентрации носителей,  $n_i$ . Собственная концентрация носителей зависит от энергии запрещенной зоны (чем меньше

ширина запрещенной зоны, тем выше концентрация) и от энергии носителей (чем выше температура, тем больше энергия). Уравнение, описывающее эти зависимости записывается так:

$$n_i^2 = BT^3 \exp\left(-\frac{E_{GO}}{kT}\right), \quad (6)$$

где  $T$  – температура;

$k$  – постоянная Больцмана;

$E_{GO}$  - ширина запрещенной зоны;

$B$  - постоянная, не зависящая от температуры.

Ток короткого замыкания при увеличении температуры, увеличивается незначительно, так как при уменьшении ширины запрещенной зоны увеличивается количество фотонов, способных создать электронно-дырочные пары [5].

Выводы.

Представленные зависимости позволяют оценить влияние на работу фотопреобразователей различных внешних факторов и могут быть использованы для технической оценки эффективности их использования в системах электроснабжения.

#### Перечень ссылок

1. Генассамблея ООН объявила 2014-2024 годы Десятилетием устойчивой энергетики [http://alterenergy.in.ua/ru/news/16\\_10\\_2013.html](http://alterenergy.in.ua/ru/news/16_10_2013.html)
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлювальних та нетрадиційних джерел енергії України, Київ-2001.
3. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К., СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.И.Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
4. Фролова Н. О. Моделирование солнечных батарей на основе различных полупроводников: Автореферат, Москва 2011.
5. Электронный учебник <http://pvcdrom.pveducation.org/RU/index.html>

УДК 621.446

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПИ С ЁМКОСТЬЮ, ИНДУКТИВНОСТЬЮ И НЕЛИНЕЙНЫМ РЕЗИСТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

**Кордюков А.И., студент; Фёдоров М.М. проф., д.т.н.**

(ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина)

Особенности переходных процессов в цепи с ёмкостью, индуктивностью и нелинейным резистивным элементом на примере подключения этой цепи к источнику постоянного напряжения (рис.1)

Нелинейные сопротивления (н.с.) заданы вольтамперной характеристикой (ВАХ) (рис. 2)

Вольт-амперная характеристика НС1 и НС2 аппроксимируется с помощью полинома 6 степени (1):

$$I(U) = b_1x^6 + b_2x^5 + b_3x^4 + b_4x^3 + b_5x^2 + b_6x + b_7 \quad (1)$$

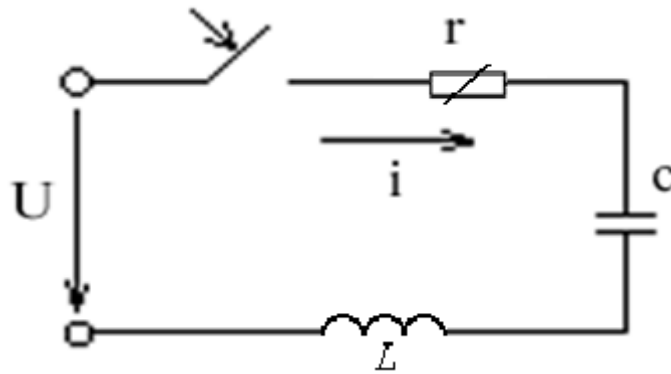


Рисунок 1 – Подключение цепи RLC с нелинейным резистором к источнику постоянного напряжения

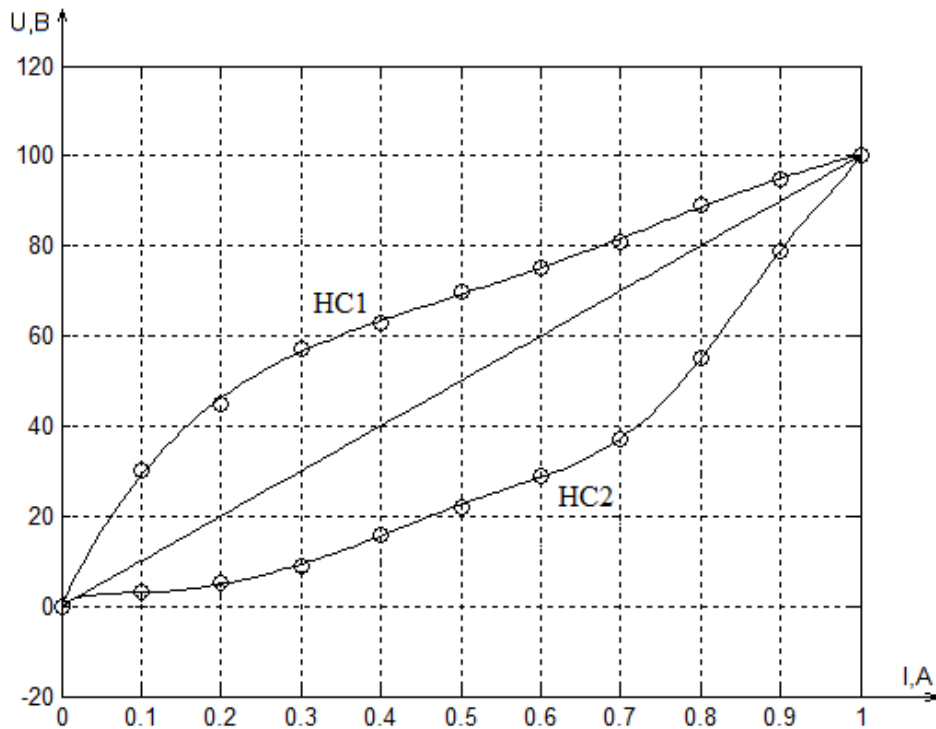


Рисунок 2 – ВАХ нелинейного резистора R

Таблица 1 - Таблица коэффициентов

Номер элемента	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$
HC1	-125.7	536.3	-918	1063.2	-830.5	373.8	-0.1
HC2	-3.6268	100.63	-167.44	246.97	-133.3	56.891	-0.0427

Линейный элемент имеет резистивное сопротивление равное 100 Ом. HC1 в интервале от 0 до 0.35 А имеет сопротивление больше 100 Ом, а на интервале от 0.35 А – меньше 100 Ом. HC2 в интервале от 0 до 0.6 А имеет сопротивление меньше 100 Ом, а в интервале от 0.6 А – больше 100 Ом.

Переходные процессы в цепи RLC описаны системой уравнений (2)

$$\begin{cases} U = ir + L \frac{di}{dt} + u_c \\ i = C \frac{du_c}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

Расчёт переходных процессов осуществляется численным методом, согласно которому ток в момент времени  $t_k$  определяется системой уравнений (3):

$$\begin{cases} i_{k+1} = i_k + \Delta i_k \\ u_{c(k+1)} = u_{ck} + \Delta u_{ck} \end{cases} \quad (3)$$

где:

$i_k$  и  $u_{ck}$  – ток на индуктивности и напряжение на конденсаторе в момент времени  $t_k$ ;

$i_{k+1}$  и  $u_{c(k+1)}$  – ток на индуктивности и напряжение на конденсаторе в момент времени  $t_k + \Delta t$ ;

$\Delta i_k$  и  $\Delta u_{ck}$  – приращение тока на индуктивности и напряжения на конденсаторе на промежутке времени  $\Delta t$ ;

Величину  $\Delta t_k$  выбираем из условия  $\Delta t = \frac{t_{\text{ин}}}{N}$ , где:

$t_{\text{ин}}$  – время переходного процесса в цепи R-L-C с линейным резистивным элементом, величина которого равна  $r = 100 \text{ Ом}$ ;

$N$  – Количество точек, равное  $100 \div 1000$ .

Величина  $r$ ,  $L$  и  $C$  выбирается из условия  $r = r_{\text{кр}} = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$  – предельный случай апериодического процесса, в этом случае время переходного процесса  $t_{\text{ин}}$  определяется по формуле (4):

$$t_{\text{ин}} = 4 \frac{2L}{r} \quad (4)$$

Для определения приращения тока  $\Delta i_k$  и напряжения на конденсаторе  $\Delta u_c$  воспользуемся системой дифференциальных уравнений цепи (3):

$$\begin{cases} \Delta i_k = \frac{U - u_r - u_c}{L} * \Delta t \\ \Delta u_c = \frac{i \cdot \Delta t}{C} \end{cases} \quad (5)$$

На каждом этапе величина  $Ur$  определяется по ВАХ нелинейных элементов цепи. Используя полученный алгоритм, были рассчитаны переходные процессы для двух случаев с нелинейным резистивным элементом и для одного случая с линейным резистором, которые приведены на рисунке 3 и 4.

Выводы: Из результатов следует, что переходный процесс с НС1, у которого на первом этапе сопротивление больше 100 Ом имеет определённое приближение к колебательному процессу и переходный процесс заканчивается быстрее, так как на более поздних этапах его сопротивление возрастает.

Для НС2 – картина противоположная. Переходный процесс имеет апериодический характер и длительность переходного процесса больше, чем при линейном сопротивлении, так как на поздних этапах сопротивление уменьшается.

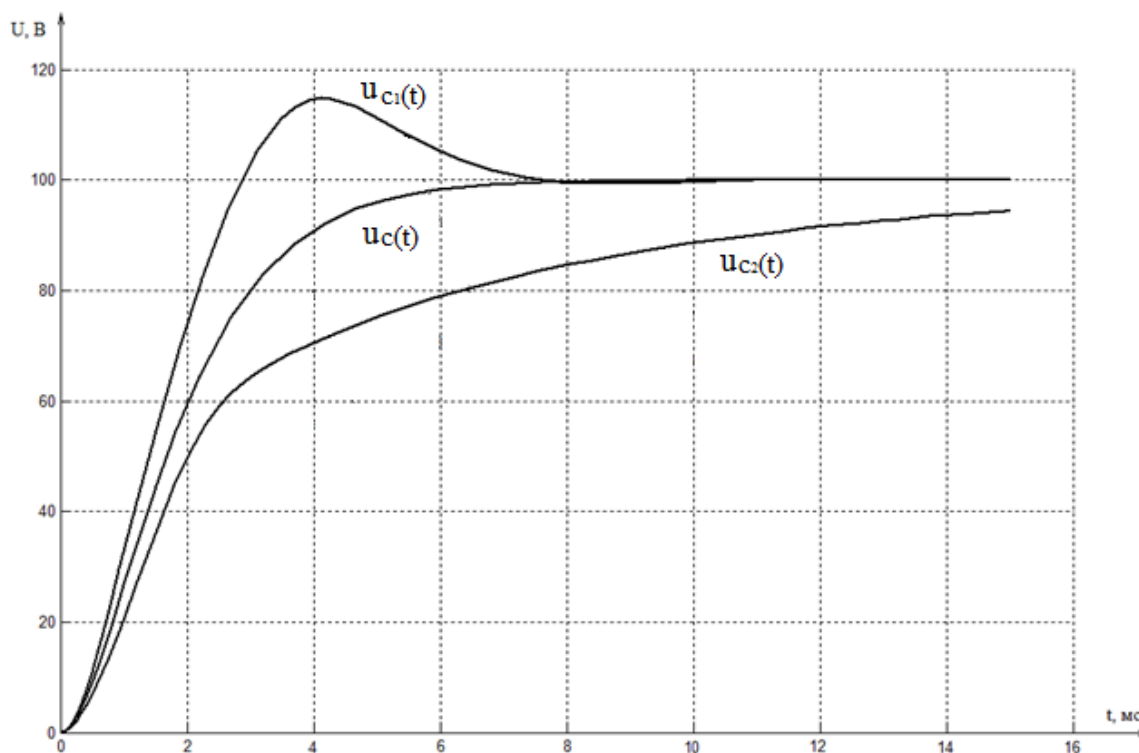


Рисунок 3 – Графики изменения напряжения на ёмкости

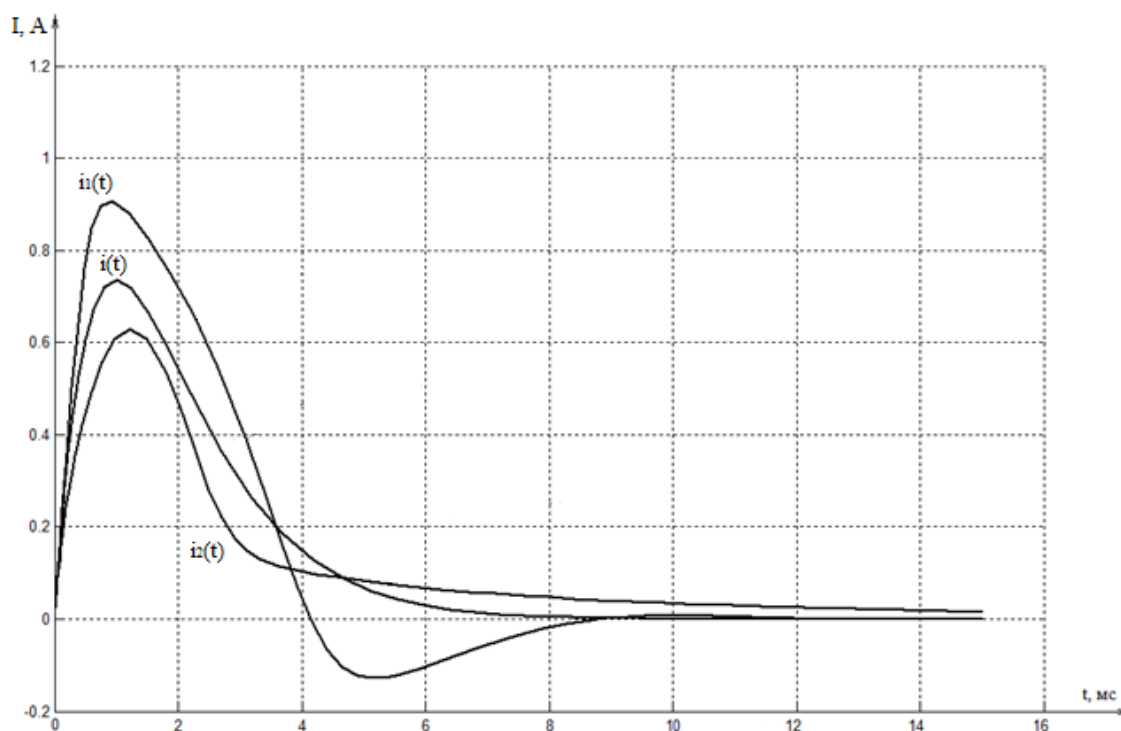


Рисунок 4 – Графики изменения тока на индуктивности

#### Перечень ссылок

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1989.- 530 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: «Высшая школа», 1996. – 638 с.
3. Программный пакет Matlab 2013.