

**ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ (СУ ППЭ)
ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ (ДСП)**

Лютая А. В., Картамышев Д. А.

Проведена оценка адекватности ранее разработанной математической модели системы управления приводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи, описанной в виде системы дифференциальных уравнений, путём сравнения переходных процессов уравнений, являющихся решением данной системы и выходных значений основных компонентов структурной модели, основанной на использовании передаточных функций. Доказано, что вид, время переходного процесса и отсутствие статической ошибки подтверждают соответствие математической модели его структурному описанию, а искомая выходная величина – длина дуги совпадает с техническими характеристиками ДСП.

Проведена оцінка адекватності раніше розробленої математичної моделі системи управління приводом переміщення електродів дугової сталеплавильної печі, описаної у вигляді системи диференціальних рівнянь, шляхом порівняння перехідних процесів рівнянь, що є вирішенням даної системи та вихідних значень основних компонентів структурної моделі, заснованої на використанні передавальних функцій. Доведено, що вид, час перехідного процесу та відсутність статичної помилки підтверджують відповідність математичної моделі її структурному опису, а шукана вихідна величина – довжина дуги збігається з технічними характеристиками ДСП.

The evaluation of the adequacy of previously developed mathematical model of the management system by the movement driven of electrodes of the electric arc furnace is assessed. It described as a system of differential equations by comparing the transient of equations. These equations are solutions of the system and the output values of the main components of the structural model based on the use of transfer functions. It is proved that kind of time the transition process and the lack of static error confirm compliance with the mathematical model of its structural description and the required output value – the length of the arc coincides with the technical specifications of the EAF.

Лютая А. В.

Картамышев Д. А.

канд. техн. наук,
ст. преп. каф. АПП ДГМА
neytiri77@mail.ru
студент ДГМА
dima_kartamyshev@ukr.net

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.365.2

Лютая А. В., Каргамышев Д. А.

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ (СУ ППЭ) ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ (ДСП)

Одним из основных параметров, влияющих на энергетические характеристики ДСП, является длина дуги. Три электрические дуги горят между концами графитовых электродов и расплавленным металлом, осуществляя процесс плавления в печи. Для регулирования положения электродов дуговых сталеплавильных печей применяют системы управления приводами перемещения электродов (СУ ППЭ) ДСП. В процессе работы печи привод перемещения электродов должен изменять длину дугового промежутка, соответствующую заданной мощности, с высокой точностью, чтобы увеличить производительность, снизить энергозатраты и время плавления.

Моделирование и исследование моделей трёхфазной электрической цепи и СУ ППЭ производилось в предыдущих работах [1–4]. Математическим моделированием линейных и линеаризованных систем занималось множество ученых [5]. Данные исследования применимы к нашему объекту, так как способствуют более точному его описанию.

Целью работы является оценка адекватности математической модели СУ ППЭ ДСП, разработанной в работе [1].

Для достижения поставленной цели необходимо на основе математической модели, полученной в работе [1] разработать структурную модель СУ ППЭ ДСП в программном пакете *MatLab Simulink*, произвести сравнительный анализ выходных параметров структурных элементов для подтверждения точности описания модели.

Автоматизированная система регулирования перемещения электродов ДСП-50 состоит из электрической цепи и системы управления приводом перемещения электродов ДСП. На рис. 1 представлена структурная схема системы автоматического управления (САУ) ППЭ ДСП с импедансными регуляторами перемещения электродов для одной фазы. Для двух других фаз схемы имеют такой же вид.

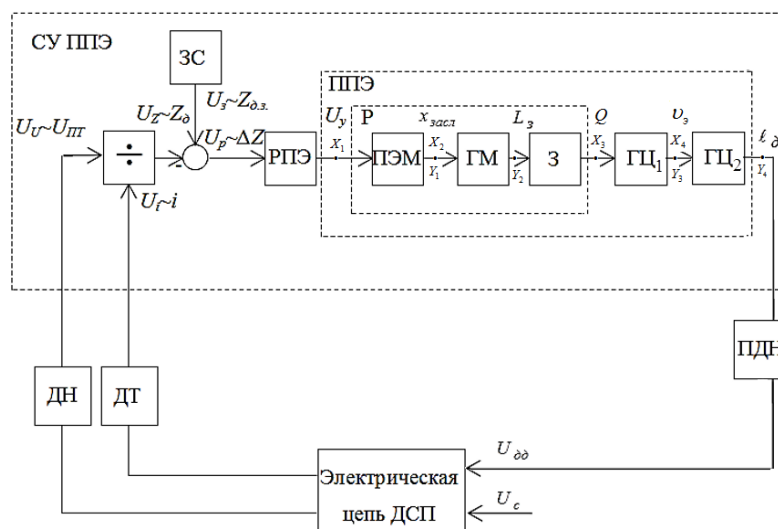


Рис. 1. Структурная схема САУ ППЭ ДСП с импедансным РПЭ для одной фазы

Принцип работы СУ ППЭ заключается в том, что сигналы с датчиков тока и напряжения поступают на импедансный регулятор перемещения электродов РПЭ. В данном регуляторе происходит сравнение с заданием и с выхода импедансного регулятора сигнал рассогласования поступает на П-регулятор (РПЭ). Сигнал управления U_y с регулятора поступает на электрогидравлический привод перемещения электродов ППЭ, который состоит из пропорционального электромагнита, гидрораспределителя (гидравлического моста и золотника) и гидроцилиндра перемещения электрода. На выходе ППЭ формируется сигнал на перемещение электрода, то есть сигнал длины дуги ℓ_o . Сигнал длины дуги преобразуется в действующее напряжение дуги согласно (ПДН).

На основе структурной схемы (рис.1) в работе [1] была разработана математическая модель СУ ППЭ, которая в общем случае имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_1(t)}{dt} &= \frac{0,12 \cdot \left(\frac{a \cdot U_{\text{ПТ}}}{b \cdot I_o} - Z_o \right) \cdot K_{\text{РПЭ}} - 100 \cdot y_1(t)}{28,8}; \\ \frac{dy_2(t)}{dt} &= \frac{1,54 \cdot y_1(t) - y_2(t)}{0,0172}; \\ \frac{dy_3(t)}{dt} &= \frac{4 \cdot y_2(t) \cdot K_3 - y_3(t)}{0,28}; \\ \frac{dy_4(t)}{dt} &= y_3(t); \\ U_o(t) &= \alpha + \beta \cdot y_4(t). \end{aligned} \right\}$$

Подставив значения сигналов напряжения вторичной обмотки печного трансформатора $U_{\text{ПТ}} = 658B$, ток дуги $I_o = 40000 A$, и задание импеданса $Z_o = 0,0056 \text{ Ом}$ значения коэффициентов a и b трансформаторов тока и напряжения $a = 40$, $b = 883,3$, коэффициент регулятора перемещения электродов $K_{\text{РПЭ}} = 31$, мы получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_1(t)}{dt} &= \frac{1,2 - 100 \cdot y_1(t)}{28,8}; \\ \frac{dy_2(t)}{dt} &= \frac{1,54 \cdot y_1(t) - y_2(t)}{0,0172}; \\ \frac{dy_3(t)}{dt} &= \frac{0,648 \cdot y_2(t) - y_3(t)}{0,28}; \\ \frac{dy_4(t)}{dt} &= y_3(t); \\ U_o(t) &= 40 + 883,3 \cdot y_4(t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В программной среде WolframAlpha мы получили решение данной системы [1], где каждое уравнение описывает соответствующий структурный элемент. В соответствии со структурной схемой (рис. 1) с использованием ранее рассчитанных передаточных функций всех её элементов [3] разработаем структурную модель СУ ППЭ ДСП в программном пакете *MatLab Simulink*. Структура модели СУ ППЭ ДСП представлена на рис. 2. Сравним графики решений каждого уравнения и переходный процесс на выходе структурных элементов модели.

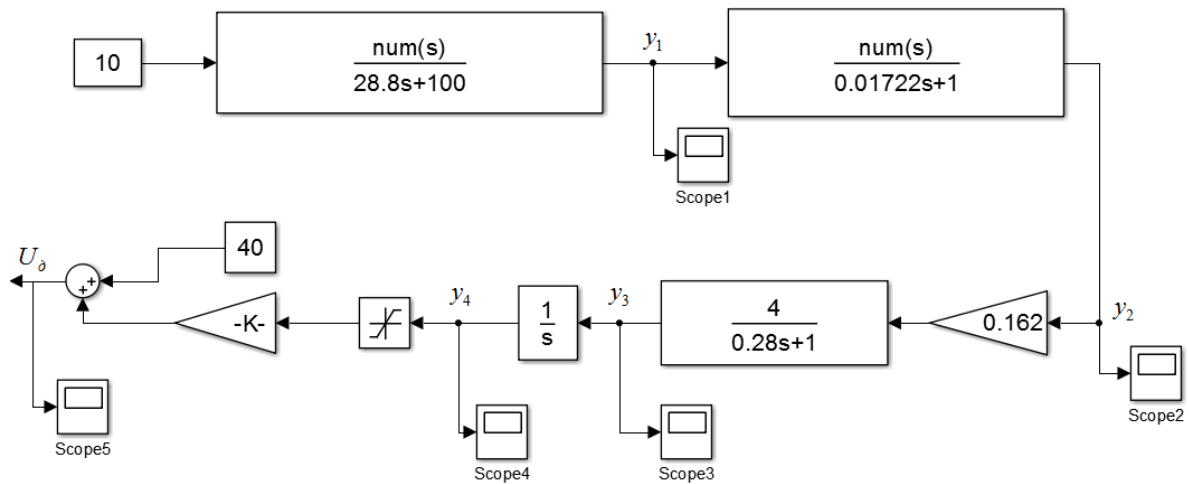


Рис. 2. Структура модели СУ ППЭ ДСП в программном пакете *MatLab Simulink*

Решением первого дифференциального уравнения системы уравнений, описывающего ПЭМ является:

$$y_1(t) = 0,012e^{(-3.47222t)} (e^{(3.47222t)} - 1).$$

График решения первого дифференциального уравнения представлен на рис. 3. График переходного процесса с выхода ПЭМ представлен на рис. 4.

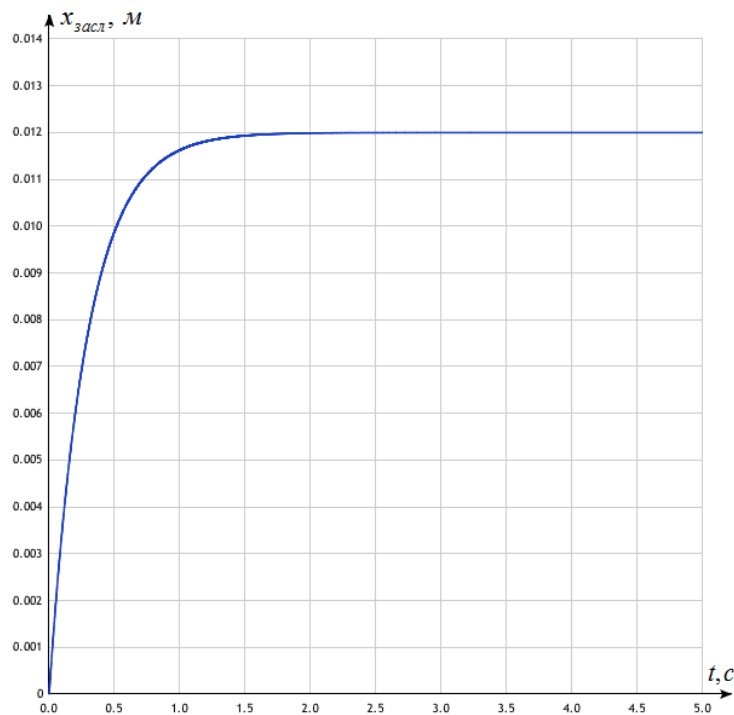


Рис. 3. График решения дифференциального уравнения, описывающего ПЭМ

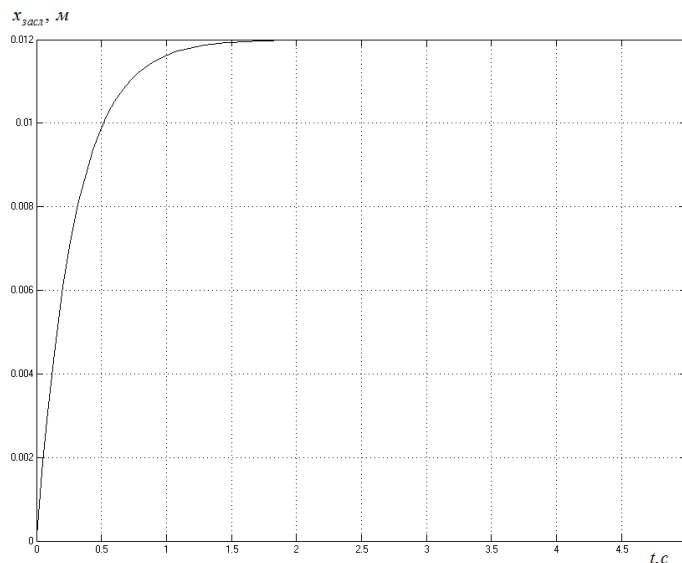


Рис. 4. График переходного процесса с выхода ПЭМ в программной среде MATLAB Simulink

Сравнивая полученные графики, время переходного процесса $t_{mn} = 1,66c$, отсутствие статической ошибки и величину установившегося значения $y_1 = 0,012$ была подтверждена корректность описания структурного элемента ППЭ в модели MATLAB.

Решением второго дифференциального уравнения системы уравнений, описывающего гидравлический мост (ГМ) является:

$$y_2(t) = 0,0185 - 0,0185e^{(-58,1395t)}.$$

График решения второго дифференциального уравнения представлен на рис. 5. График переходного процесса с выхода ГМ в структуре модели в MATLAB Simulink представлен на рис. 6.

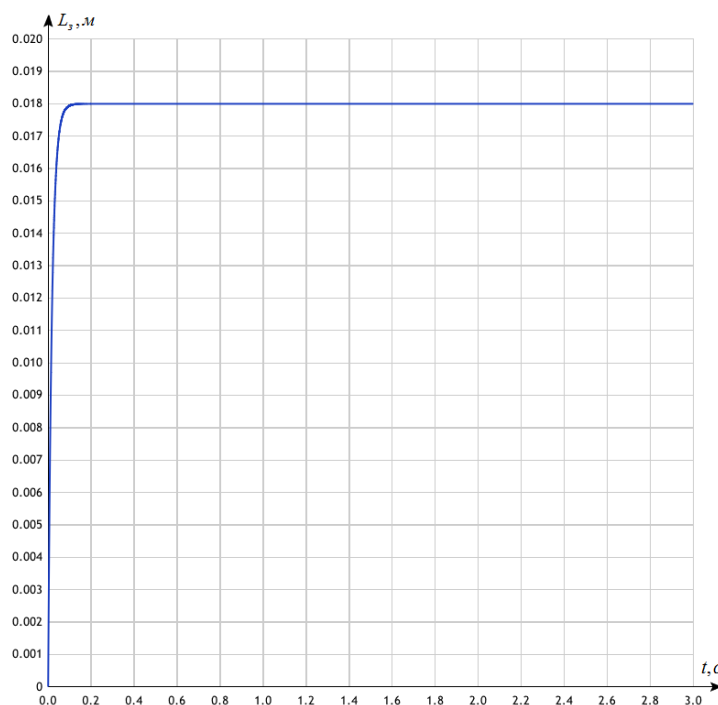


Рис. 5. График решения дифференциального уравнения, описывающего ГМ

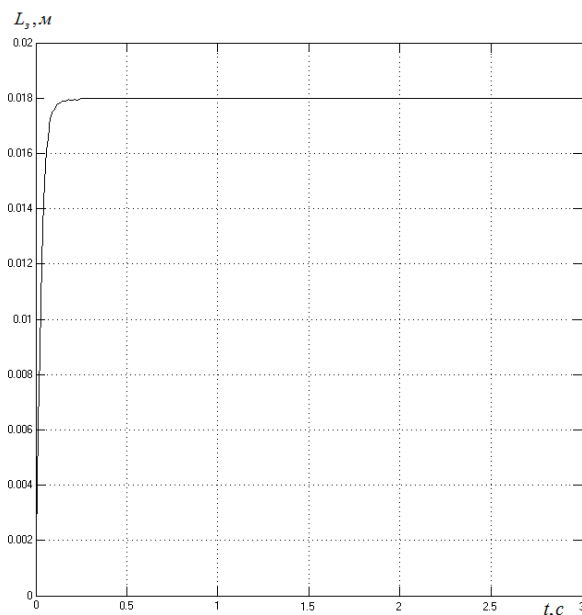


Рис. 6. График переходного процесса с выхода ГМ в структуре модели, выполненной в программной среде MATLAB Simulink

Проанализировав полученные графики, с учётом отсутствия статической ошибки, времени переходного процесса $t_{mn} = 0,08 c$, и величины установившегося значения $y_2 = 0,018$, было подтверждено соответствие структурного элемента ГМ в модели MATLAB его математическому описанию.

Решением третьего дифференциального уравнения первой части гидроцилиндра (ГЦ₁), входящего в систему уравнений является:

$$y_3(t) = 0,01198 - 0,01198e^{(-3.57143t)}.$$

График решения третьего дифференциального уравнения представлен на рис. 7. График переходного процесса с выхода ГЦ₁ в структуре модели, разработанной в среде MATLAB Simulink представлен на рис. 8.

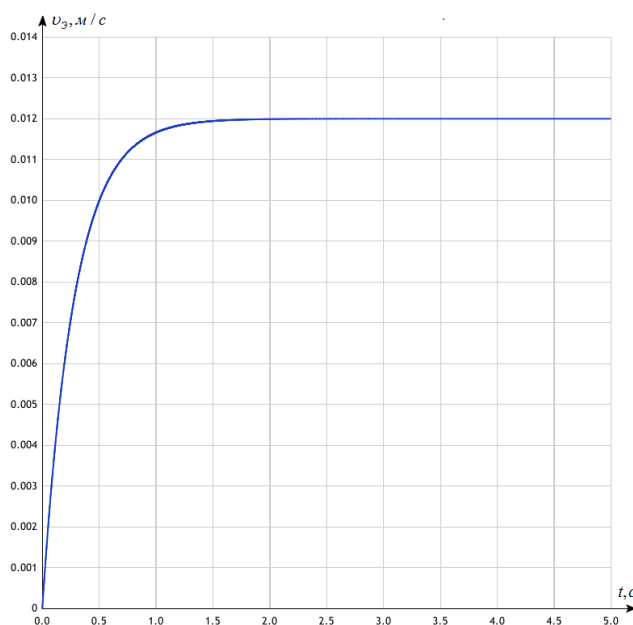


Рис. 7. График решения третьего дифференциального уравнения ГЦ₁

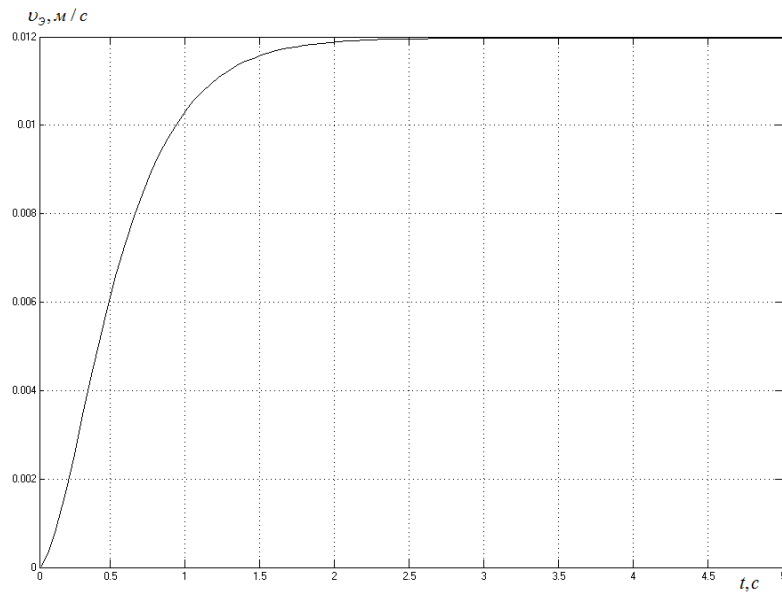


Рис. 8. График переходного процесса с выхода ГЦ₁ в структуре модели СУ ППЭ ДСП

Сравнивая данные графики, получено время переходного процесса $t_m = 2,2 \text{ с}$, статическая ошибка отсутствует, установившееся значение $y_3 = 0,012$, что подтверждает соответствие структурного элемента в модели MATLAB математической модели ГЦ₁

Решением четвёртого дифференциального уравнения второй части гидроцилиндра (ГЦ₂), входящего в систему уравнений является:

$$y_4(t) = 0,012 t + 0,3.$$

График решения четвёртого дифференциального уравнения, описывающий изменение длины дуги представлен на рис. 9. График переходного процесса с выхода ГЦ₂ в структуре модели, разработанной в MATLAB Simulink представлен на рис. 10.

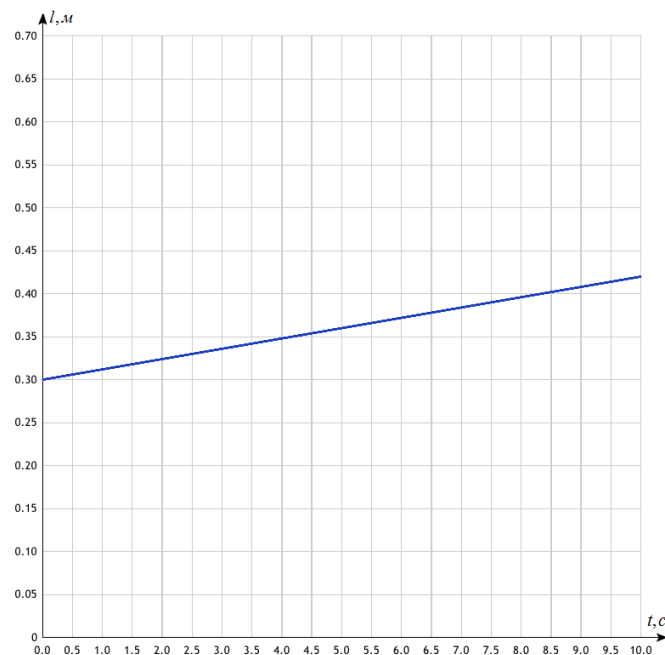


Рис. 9. График решения дифференциального уравнения, описывающего изменение длины дуги

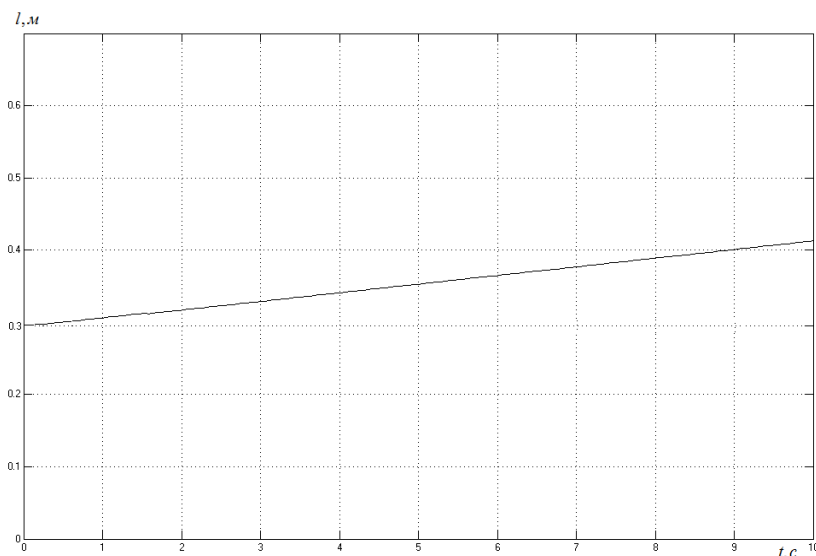


Рис. 10. График переходного процесса изменение длины дуги с выхода ГЦ₂ в структуре модели СУ ППЭ ДСП

Анализ данных графиков подтверждает адекватность модели СУ ППЭ ДСП его математическому описанию, разработанному ранее [1], поскольку начальное значение $y_4 = 0,3$ соответствует длине дугового промежутка, исходя из технических данных ДСП [3], а линейно-нарастающая зависимость отражает поведение системы в момент подачи U_y на вход ПЭМ, тем самым осуществляя процесс подъёма электродов, сопровождающегося увеличением значения длины дуги.

ВЫВОДЫ

Была подтверждена адекватность математической модели СУ ППЭ ДСП, что свидетельствует о наиболее точном описании поведения структурных элементов системы, и позволяет применить её в дальнейших исследованиях различного рода возмущений в плавильном пространстве ДСП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лютая А. В. Разработка математической модели системы управления приводом перемещения электродов (СУ ППЭ) дуговой сталеплавильной печи (ДСП) / А. В. Лютая, Д. А. Картамышев // Вестник ДГМА. – 2015. – № 2 (17E). – С. 103–113.
2. Лютая А. В. Исследование влияния изменения задания импеданса на величину длины дуги дуговой сталеплавильной печи (ДСП) / А. В. Лютая, Д. А. Картамышев // Вестник ДГМА. – 2014. – № 2 (14E).
3. Лютая А. В. Исследование влияния коэффициента передачи П-регулятора перемещения электрода на величину колебаний длины дуги дуговой сталеплавильной печи (ДСП) / А. В. Лютая, Д. А. Картамышев // Вестник ДГМА. – 2015. – № 1 (34).
4. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с., ил.
5. Карпенко С.В. Разработка математической модели и компьютерной системы для исследования трёхфазных цепей с электрическими дугами / С. В. Карпенко, В. Д. Сарычев, С. П. Мочалов // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия № 6. – М., 2006. – С. 48.