

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

Лютая А. В., Картамышев Д. А.

Разработана математическая модель системы управления приводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи, описывающая каждый структурный компонент в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши, позволяющая оценить выходные параметры каждого элемента СУ ППЭ. При решении данной системы получены уравнения, по которым построены графики переходных процессов каждого структурного элемента. Полученные графики позволяют оценить характер протекания процессов в СУ ППЭ. Доказано, что уравнение системы, описывающее изменение длины дуги, полностью соответствует техническим данным ДСП, а характер протекания процесса, сопровождающийся увеличением длины дугового промежутка, подтверждает реакцию системы на входное воздействие в виде подачи сигнала на открытие заслонки и подъема электродов.

Розроблено математичну модель системи управління приводом переміщення електродів дугової сталеплавильної печі, що описує кожен структурний компонент у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь у формі Коші, та дозволяє оцінити вихідні параметри кожного елемента СУ ППЕ. При вирішенні даної системи отримані рівняння, за якими побудовані графіки перехідних процесів кожного структурного елемента. Отримані графіки дозволяють оцінити характер протікання процесів в СУ ППЕ. Доведено, що рівняння системи, яке описує зміну довжини дуги, повністю відповідає технічним параметрам ДСП, а характер протікання процесу, що супроводжується збільшенням довжини дугового проміжку, підтверджує реакцію системи на вхідний вплив у вигляді подання сигналу на відкриття заслінки і підйому електродів.

A mathematical model of the management system by the movement driven of electrodes of the electric arc furnace was developed. It describes each structural component in the form of a system of ordinary differential equations and it evaluates the output parameters of each element of the management system. Graphs of transients for each structural element are obtained from the equations, which have received in the solution of the system. These graphs allow evaluating the nature of the processes in the management system by the movement driven of electrodes. It is proved that the equation system, describing the change in the length of the arc, is fully consistent with the characteristics of the electric arc furnace. The nature of the process, accompanied by an increase in the length of the arc, confirms the system's response to the impact of the input signal in the form of feed to the opening flap and lifting the electrode.

Лютая А. В.

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

Картамышев Д. А.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.365.2

Лютая А. В., Каргамышев Д. А.

РАЗРАБОТКА 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 расплавляемым 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, 2]. Математическим моделированием линейных и линеаризованных систем занималось множество ученых [3–5]. Данные исследования применимы к нашему объекту, так как способствуют более точному его описанию.

Целью работы является разработка математической модели СУ ППЭ ДСП, которая позволит упростить структурные составляющие модели, снизить время расчёта параметров, способствуя более гибкой применимости в исследованиях, без ущерба точности.

Для достижения поставленной цели необходимо представить в более удобном, для математического описания, виде структурную схему пропорционального электромагнита (ПЭМ), используемую в работах [1, 2], на основе структурной схемы СУ ППЭ составить систему дифференциальных уравнений в форме Коши и разработать структурную схему в программном пакете *MatLab Simulink* для анализа выходных параметров.

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.

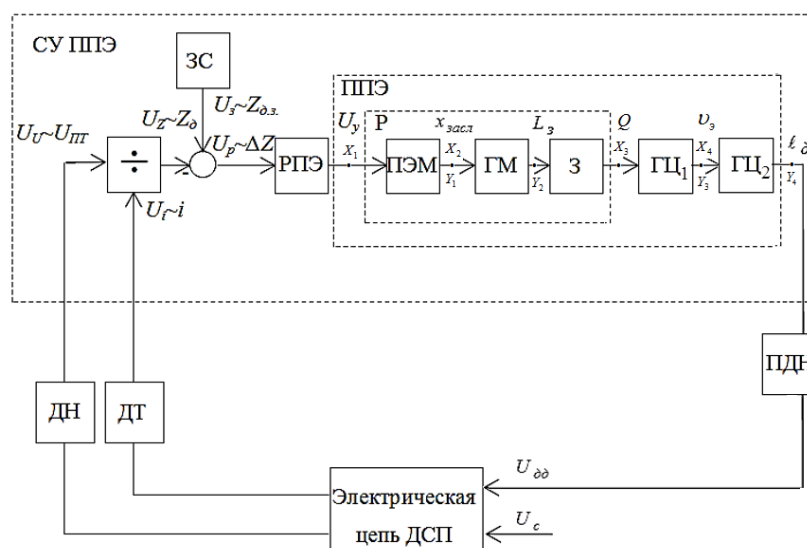


Рис. 1. Структурная схема САУ ППЭ ДСП с импедансным РПЭ для одной фазы

Параметром регулирования в данном регуляторе является полное сопротивление дуги – сопротивление короткой сети, электрода и дуги.

Электрическая цепь ДСП представляет собой трехфазную цепь, на вход которой подается напряжение вторичной обмотки печного трансформатора – напряжение сети U_c , а также действующее значение напряжения дуги $U_{\partial\partial}$, которое формируется с помощью блока преобразования длины дуги в напряжение ПДН, на вход которого подается сигнал длины дуги ℓ_{∂} , который формируется на выходе системы управления приводом перемещения электродов ДСП. На вход системы управления привода перемещения электродов подаются сигналы с датчиков напряжения ДН и датчика тока ДТ.

В работе проводится моделирование автоматизированной системы регулирования электрогидравлическим приводом перемещения электродов ДСП с импедансными регуляторами перемещения электродов

В основе импедансных регуляторов перемещения электродов лежат три независимых регулятора полного сопротивления для трех фаз:

$$U_p = \frac{aU_{\text{ПТ}}}{bI_{\partial}} = \frac{a}{b} z_{\partial}, \quad (1)$$

где a и b – постоянные коэффициенты, зависящие от коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов напряжения и тока;

$U_{\text{ПТ}}$ – напряжение на выходе печного трансформатора;

I_{∂} – ток дуги;

z_{∂} – полное сопротивление дуги.

В работе регулятора применяются значения с датчика напряжения ДН на выходе печного трансформатора и датчика тока ДТ дуги. Информация с выходов этих блоков передается на вход блока деления, где полученное напряжение делится на ток дуги, вследствие чего на выходе появляется сигнал с информацией об импедансе, т.е. полном сопротивлении дуги. Этот сигнал сравнивается с заданным значением сопротивления дуги с помощью задатчика сопротивления ЗС, формируя сигнал рассогласования, поступающий на РПЭ.

Сигнал с выхода РПЭ поступает на ППЭ, который состоит из пропорционального электромагнита, гидрораспределителя (гидравлического моста и золотника) и гидроцилиндра перемещения электрода. Сигнал длины дуги преобразуется в действующее напряжение дуги по формуле Фрелиха, которая при рабочих токах выше 10^4 А с достаточной степенью точности выражает действующее значение напряжения на дуге:

$$U_{\partial}(t) = \alpha + \beta \cdot \ell_{\partial}(t), \quad (2)$$

где α – сумма падений напряжений у анода и катода;

$\ell_{\partial}(t)$ – длина дугового разряда;

β – падение напряжения на 1 мм столба дуги (градиент напряжения столба дуги), который зависит от периода плавки.

Математической основой расчета является система дифференциальных уравнений, описывающих СУ ППЭ ДСП, записанных в форме Коши:

$$\begin{cases} Y'1 = \int 1(Y1, \dots, Yn, x); \\ Y'n = n \int n(Y1, \dots, Yn, x), \end{cases} \quad (3)$$

при $Y_1(0) = \tilde{Y}, Y_2(0) = \tilde{Y}_2 \dots Yn(0) = \tilde{Y}n$, где $Y'1, Y'2, \dots, Y'n$ координаты СУ ППЭ;

n – порядок системы дифференциальных уравнений;

x – аргумент.

Система дифференциальных уравнений составляется на основе структурной схемы (см. рис. 1). На структурной схеме входные и выходные параметры звеньев, в знаменателе передаточных функций которых содержится оператор дифференцирования p , обозначают через x_i и y_i с числовыми индексами.

Входным параметрам присваивается индекс, на единицу больший индекса предыдущего выходного параметра. Обозначим входные параметры звеньев через x . Выходным параметрам в качестве индекса присваивается степень оператора в знаменателе передаточной функции, начиная с первого звена. В последующих звеньях индекс увеличивается на величину степени оператора p , а $yp(t) = \frac{dy(t)}{dt}$ [5].

Для начала опишем передаточные функции всех элементов системы. Коэффициенты передаточных функций взяты из работы [1].

В работе [1] при моделировании пропорционального электромагнита учитывалась как электрическая, так и механическая части ПЭМ и более детально описывались все электромеханические связи в виде колебательного звена с целью проследить за численными значениями всех усилий, действующих на электромагнит.

На рис. 2 приведена структурная схема ПЭМ, на котором приняты следующие обозначения: $W_\varepsilon(p)$ – передаточная функция электрической части; $W_F(p)$ – передаточная функция блока преобразования тока I_α якоря в тяговое усилие.

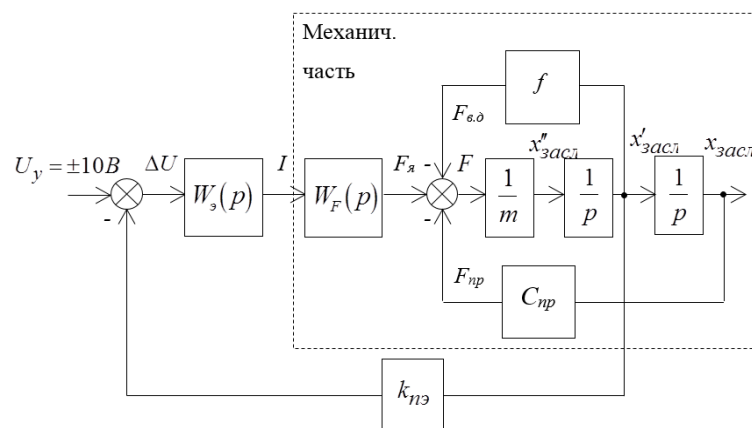


Рис. 2. Структурная схема представления пропорционального электромагнита ДСП

Структурная схема представления пропорционального электромагнита ДСП в численном виде представлена на рис. 3.

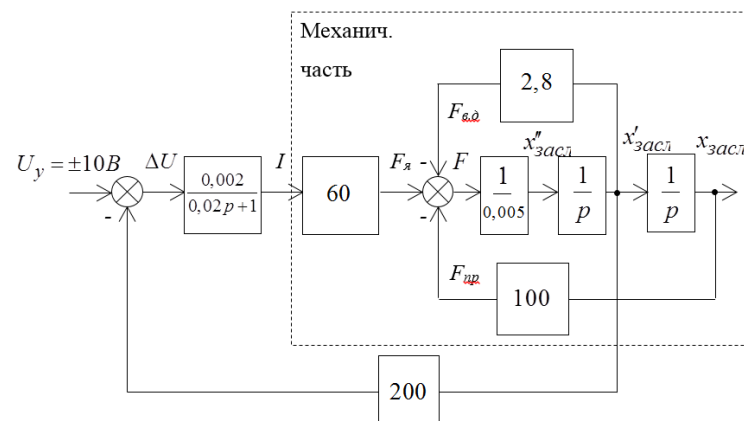


Рис. 3. Структурная схема представления ПЭМ ДСП в численном виде

Произведём преобразование последовательного и встречно-параллельного соединения звеньев к единой передаточной функции (ПФ).

Для замкнутого контура при отрицательной обратной связи передаточная функция эквивалентного звена имеет вид:

$$W(p) = \frac{W_{\Pi}(p)}{1 + W_{\Pi}(p)W_{OC}(p)}. \quad (4)$$

Таким образом, преобразовав к простейшему виду, мы получаем ПФ ПЭМ такого вида:

$$W_{ПЭМ}(p) = \frac{0,12}{0,0001 \cdot p^3 + 0,061 \cdot p^2 + 28,8 \cdot p + 100}. \quad (5)$$

Таким образом, структурная схема пропорционального электромагнита с упрощённой ПФ имеет вид, приведенный на рис. 4.

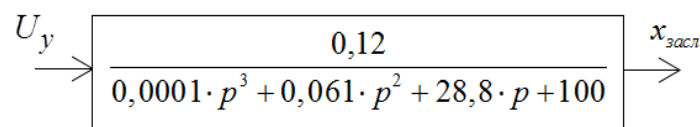


Рис. 4. Структурная схема ПЭМ ДСП с упрощённой ПФ

Сравним результаты моделирования схем исходной ПЭМ и после преобразования к единой ПФ в программной среде MATLAB Simulink. На рис. 5 приведена структурная схема исходной модели ПЭМ. На рис. 6 приведена структурная схема модели ПЭМ с упрощённой ПФ в программной среде MATLAB Simulink.

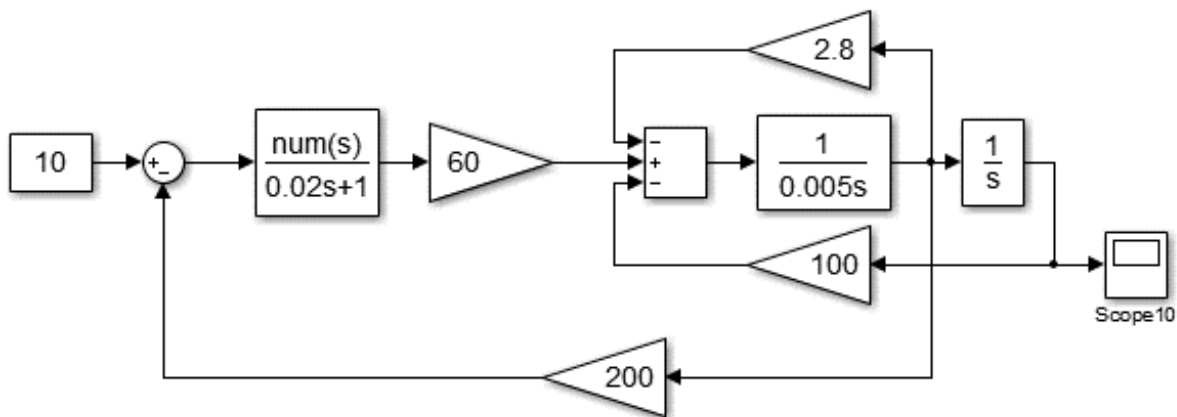


Рис. 5. Структурная схема модели ПЭМ в программной среде MATLAB Simulink

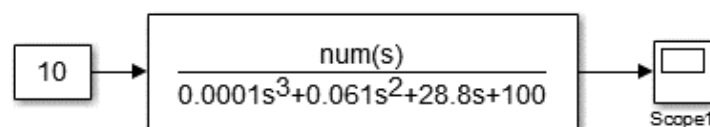


Рис. 6. Структурная схема модели ПЭМ с упрощённой ПФ в программной среде MATLAB Simulink

На вход ПЭМ подаётся $U_y = 10 В$, необходимое для перемещения заслонки, тем самым изменяя рабочие позиции гидрораспределителя и длину дуги. На рис. 7 представлены графики переходного процесса перемещения золотника на выходе ПЭМ для исходной модели и модели с упрощённой ПФ в программной среде MATLAB Simulink.

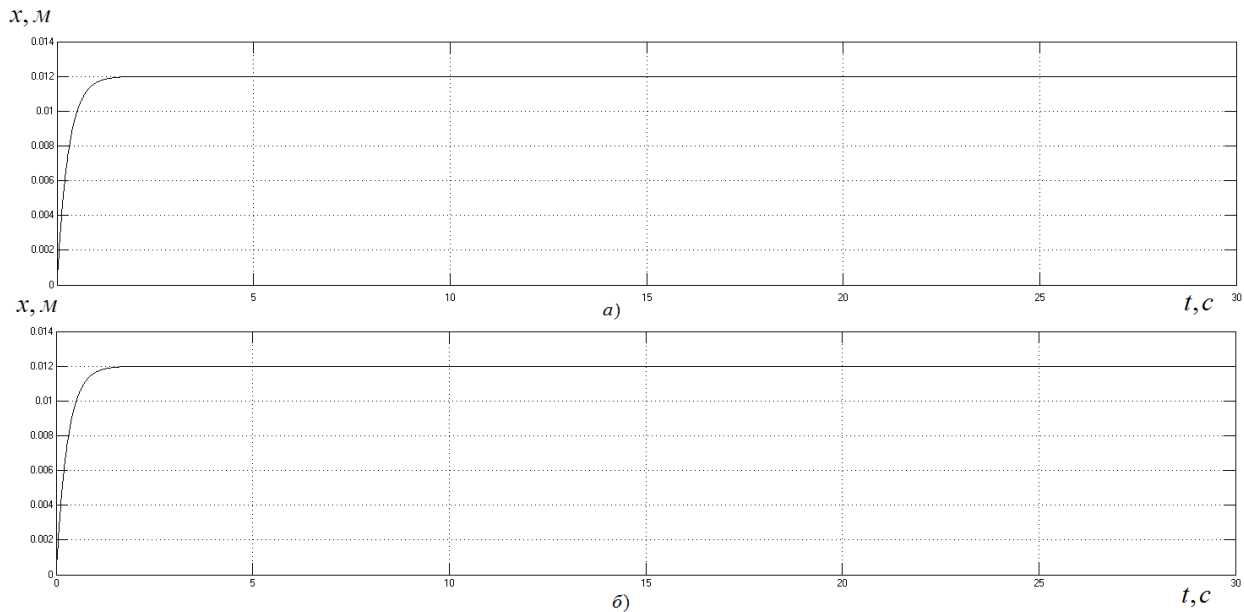


Рис. 7. Графики переходного процесса перемещения золотника в программной среде MATLAB Simulink:

а) для исходной модели; б) модели с упрощённой ПФ

Таким образом, мы видим, что форма, время переходного процесса и отсутствие статической ошибки позволяют нам использовать данную ПФ для математического описания СУ ППЭ. В итоге ПФ пропорционального электромагнита приобретает следующий вид:

$$W_{\text{ПЭМ}}(p) = \frac{0,12}{0,0001 \cdot p^3 + 0,061 \cdot p^2 + 28,8 \cdot p + 100} = \frac{y_1}{x_1} \Rightarrow$$

$$0,12 \cdot x_1 = 0,0001 \cdot \ddot{y}_1 + 0,061 \cdot \dot{y}_1 + 28,8 \cdot y_1 + 100 \cdot y_1, \quad (6)$$

Преобразовываем ПФ гидравлического моста:

$$W_{\text{ам}}(p) = \frac{1,54}{9,74 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 0,0172 \cdot p + 1} = \frac{y_2}{x_2} \Rightarrow$$

$$1,54 \cdot x_2 = 9,74 \cdot 10^{-6} \cdot \ddot{y}_2 + 28,8 \cdot \dot{y}_2 + y_2, \quad (7)$$

Передаточная функция гидроцилиндра состоит из двух частей, на выходе которых мы получаем сигналы скорости перемещения электродов и длины дуги соответственно:

$$W_{\text{ГЦ1}}(p) = \frac{4}{0,0009 \cdot p^2 + 0,28 \cdot p + 1} = \frac{y_3}{x_3} \Rightarrow 4 \cdot x_3 = 0,0009 \cdot \ddot{y}_3 + 0,28 \cdot \dot{y}_3 + y_3, \quad (8)$$

$$W_{\text{ГЦ2}}(p) = \frac{1}{p} = \frac{y_4}{x_4} \Rightarrow x_4 = \dot{y}_4.$$

Полученные дифференциальные уравнения обладают высоким порядком, что усложняет их решение, поэтому оптимизируем их, отбросив малые значения от 10^{-4} . Таким образом, мы приходим к дифференциальным уравнениям в форме Коши для систем уравнений 1-го порядка.

Выходные параметры описываются следующими алгебраическими уравнениями:

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = \frac{0,12 \cdot x_1(t) - 100 \cdot y_1(t)}{28,8};$$

$$\begin{aligned}\frac{dy_2(t)}{dt} &= \frac{1,54 \cdot x_2(t) - y_2(t)}{0,0172}; \\ \frac{dy_3(t)}{dt} &= \frac{4 \cdot x_3(t) - y_3(t)}{0,28}; \\ \frac{dy_4(t)}{dt} &= x_4(t).\end{aligned}$$

Входные параметры $x_i(t)$ описываются следующими алгебраическими уравнениями:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= \left(\frac{a \cdot U_{III}}{b \cdot I_\delta} - Z_D \right) \cdot K_{ППЭ}; \\ x_2(t) &= y_1(t); \\ x_3(t) &= y_2(t) \cdot K_3; \\ x_4(t) &= y_3(t).\end{aligned}$$

На выходе передаточной функции гидроцилиндра формируется сигнал длины дуги ℓ_δ , в нашей системе дифференциальных уравнений это y_4 . Учтём блок ПДН структурной схемы (рис. 1), используя формулу Фрелиха:

$$U_\delta(t) = \alpha + \beta \cdot \ell_\delta(t) \Rightarrow \ell_\delta(t) = y_4(t) = \frac{(U_\delta(t) - \alpha)}{\beta}. \quad (9)$$

Составим математическую модель СУ ППЭ ДСП.

$$\left. \begin{aligned}\frac{dy_1(t)}{dt} &= \frac{0,12 \cdot \left(\frac{a \cdot U_{III}}{b \cdot I_\delta} - Z_\delta \right) \cdot K_{ППЭ} - 100 \cdot y_1(t)}{28,8}; \\ \frac{dy_2(t)}{dt} &= \frac{1,54 \cdot y_1(t) - y_2(t)}{0,0172}; \\ \frac{dy_3(t)}{dt} &= \frac{4 \cdot y_2(t) \cdot K_3 - y_3(t)}{0,28}; \\ \frac{dy_4(t)}{dt} &= y_3(t); \\ U_\delta(t) &= \alpha + \beta \cdot y_4(t).\end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Для численного решения подставляем коэффициенты системы в численном виде. Значения сигналов напряжения вторичной обмотки печного трансформатора U_{III} , ток дуги I_δ , и задание импеданса Z_δ берутся из электрической цепи ДСП, таким образом $U_{III} = 658B$, $I_\delta = 40000A$, $Z_\delta = 0,0056 \text{ Ом}$. Значения коэффициентов a и b берём из технических данных трансформаторов тока и напряжения $a = 40$, $b = 883,3$, коэффициент регулятора перемещения электродов берём из работы [2] $K_{ППЭ} = 31$. Подставим данные в нашу модель для решения системы.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_1(t)}{dt} &= \frac{1,2 - 100 \cdot y_1(t)}{28,8}; \\ \frac{dy_2(t)}{dt} &= \frac{1,54 \cdot y_1(t) - y_2(t)}{0,0172}; \\ \frac{dy_3(t)}{dt} &= \frac{0,648 \cdot y_2(t) - y_3(t)}{0,28}; \\ \frac{dy_4(t)}{dt} &= y_3(t); \\ U_o(t) &= 40 + 883,3 \cdot y_4(t). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Итак, получили систему линейных обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, в программной среде WolframAlpha решаем последовательно каждое уравнение методом подстановки, решив первое уравнение методом обыкновенного интегрирования, подставляем значение y_1 во второе и находим его решение.

Находим значение y_1 :

$$y_1(t) = 0,012e^{(-3,47222t)}(e^{(3,47222t)} - 1). \quad (12)$$

График, моделирующий процесс на выходе ПЭМ, описанный данным уравнением, представлен на рис. 8.

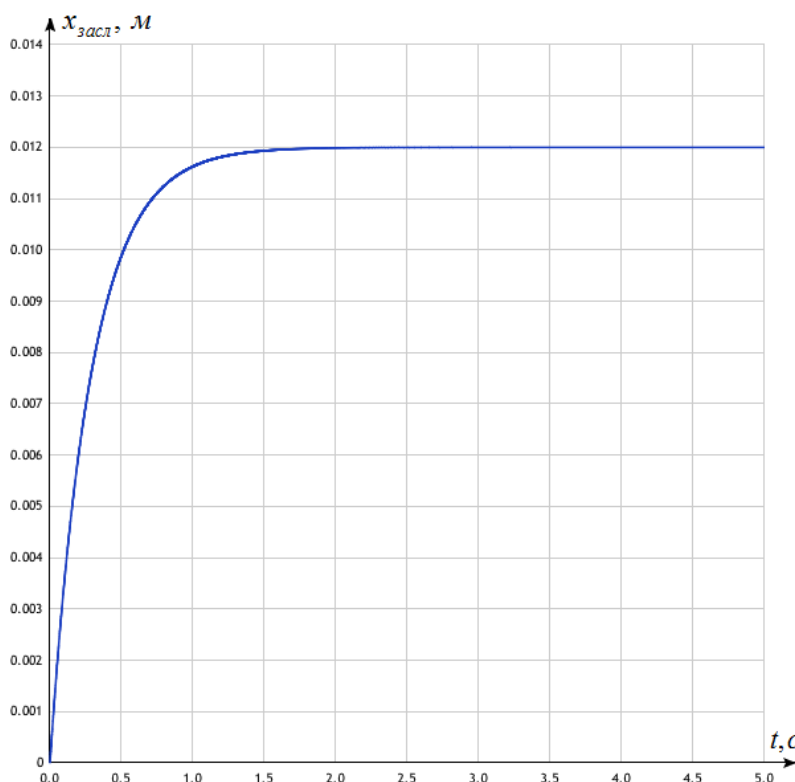


Рис. 8. График решения дифференциального уравнения, описывающего ПЭМ

Находим значение y_2 :

$$y_2(t) = 0,0185 - 0,0185e^{(-58,1395t)}. \quad (13)$$

График переходного процесса на выходе гидравлического моста, описанный данным уравнением, представлен на рис. 9.

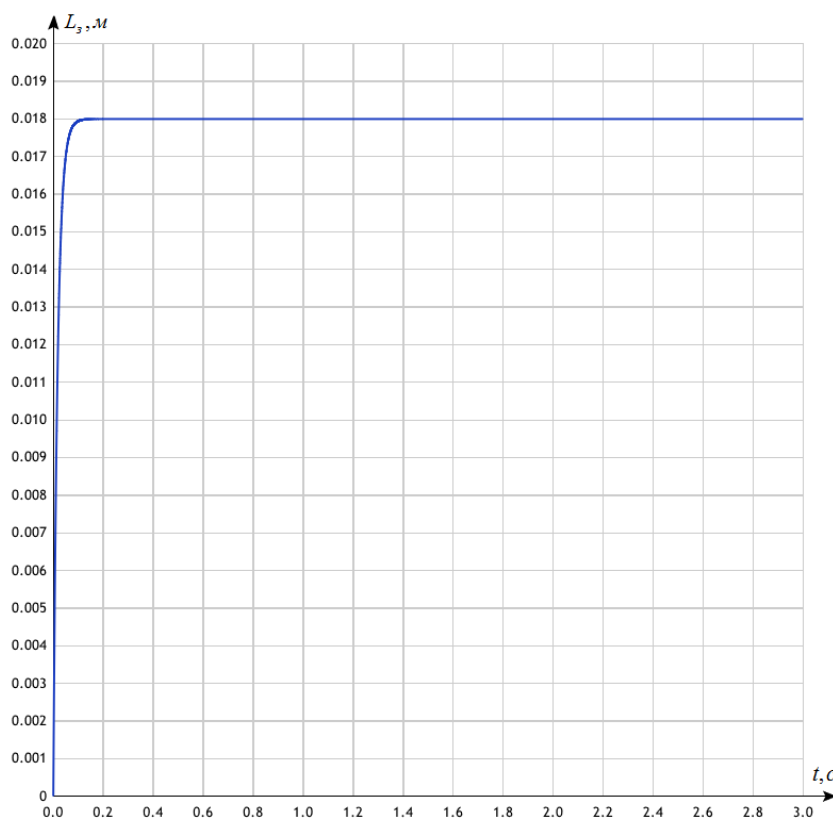


Рис. 9. График решения дифференциального уравнения, описывающего ГМ

Находим значение y_3 :

$$y_3(t) = 0,01198 - 0,01198e^{(-3,57143t)} \quad (14)$$

График, моделирующий процесс на выходе первой части ГЦ, описанный данным уравнением, представлен на рис. 10.

Находим решение y_4 :

$$y_4(t) = 0,012 t + 0,3. \quad (15)$$

График переходного процесса изменения длины дуги, описанный данным уравнением представлен на рис. 11.

Вид данного графика отражает поведение системы в момент подачи U_V на вход ПЭМ, осуществляя процесс подъема электродов с увеличением значения длины дуги.

Исходя из формулы Фрелиха и ранее найденных параметров, напряжение дуги изменяется по следующему закону

$$U_\delta(t) = 10,6 t + 304,99. \quad (16)$$

График переходного процесса изменения напряжения длины дуги, описанный данной функцией, представлен на рис. 12.

Так как сигналы напряжения дуги и длины дуги прямо пропорциональны, то наблюдается подобная форма нарастания сигнала, который подтверждает процесс подъема электродов, сопровождающегося увеличением длины дуги.

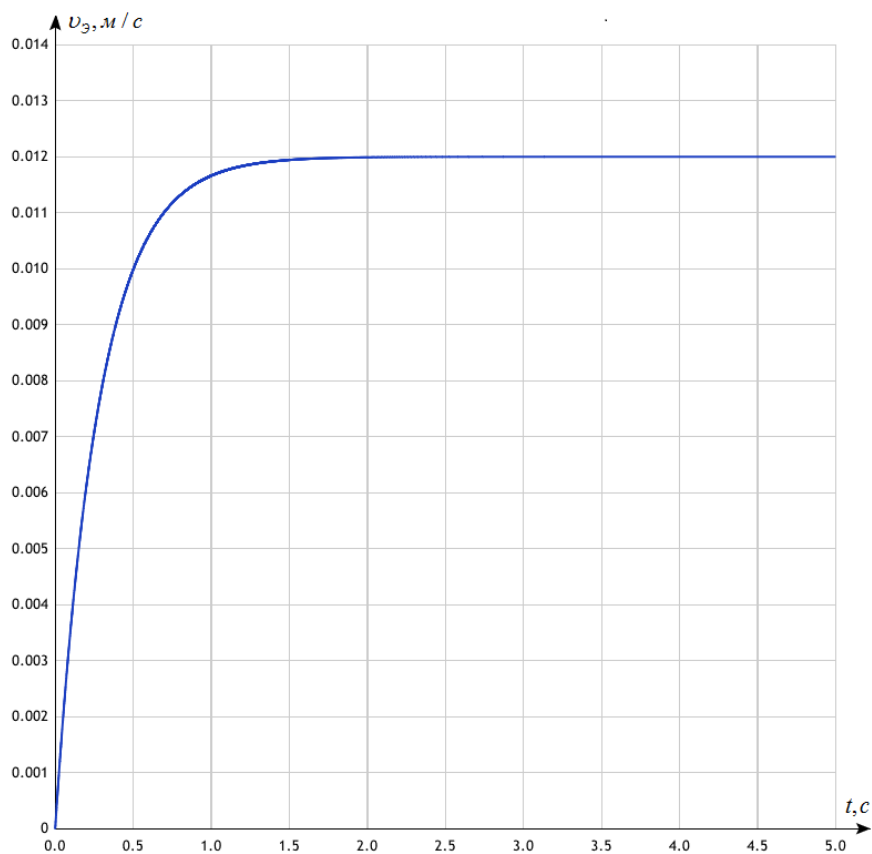
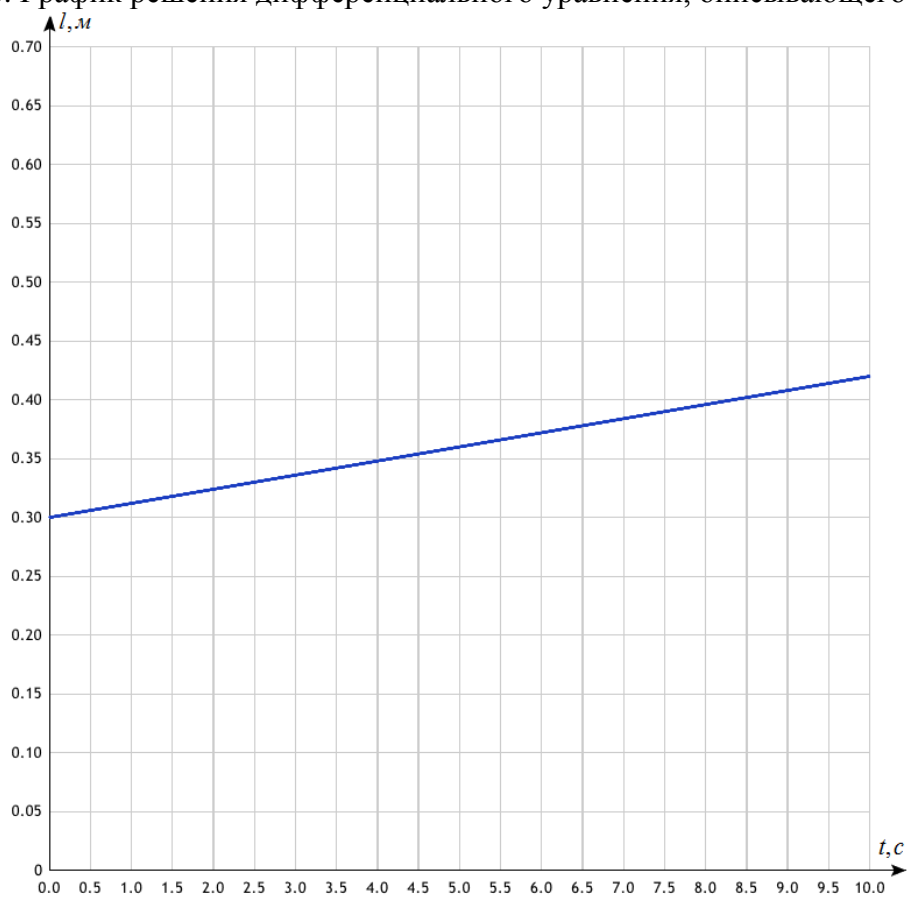
Рис. 10. График решения дифференциального уравнения, описывающего ГЦ₁

Рис. 11. График решения дифференциального уравнения, описывающего изменение длины дуги

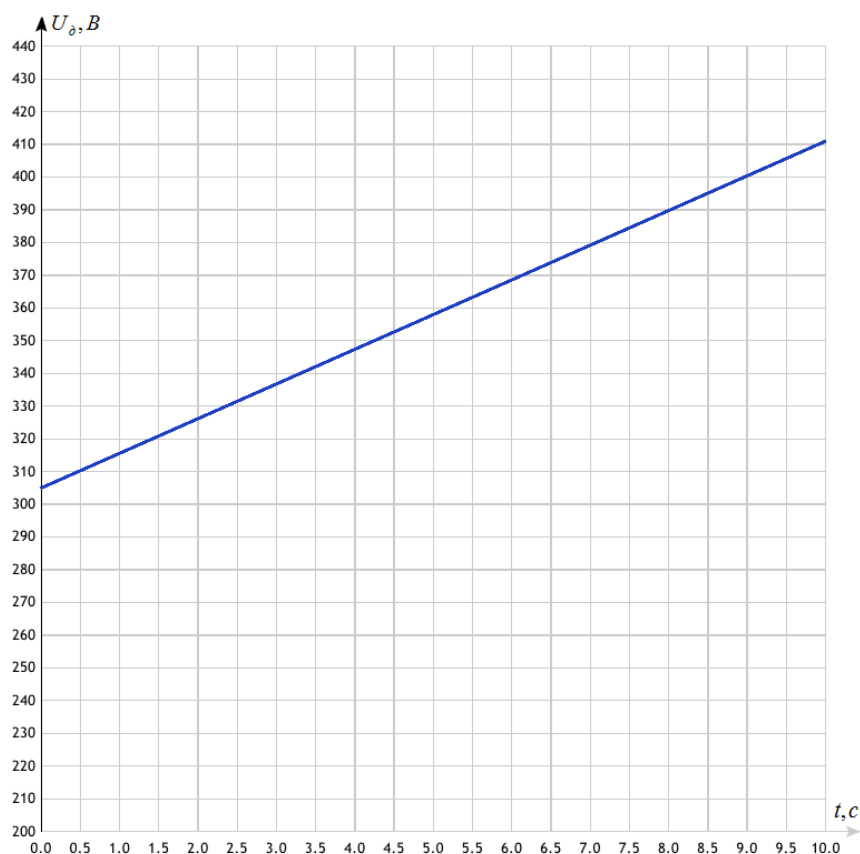


Рис. 12. График переходного процесса изменения напряжения длины дуги

ВЫВОДЫ

Была разработана математическая модель СУ ППЭ ДСП, которая даёт наиболее точное описание 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. Исследование влияния изменения задания импеданса на величину длины дуги дуговой сталеплавильной печи (ДСП) / А. В. Лютая, Д. А. Картамышев // *Научный вестник ДГМА – Краматорск : ДГМА*, 2014. – № 2 (14E). – С. 56–62.
2. 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 // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2015. – № 1 (34) – С. 51–56.
3. Свенчанский А. Д. *Электрические промышленные печи : дуговые печи и установки специального нагрева: учебник для вузов* / А. Д. Свенчанский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 296 с., ил.
4. 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*. – М., 2006. – № 6. – С. 48–51.
5. *Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления* / Под ред. Е. А. Санковского. – Минск : Высш.шк., 1973. – 584 с.