

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАДАНИЯ ИМПЕДАНСА НА ВЕЛИЧИНУ ДЛИНЫ ДУГИ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Лютая А. В., Картамьшев Д. А.

Разработана модель электрической трехфазной цепи дуговой сталеплавильной печи, позволяющая учесть нелинейность электрических дуг. Разработана модель системы управления приводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи с импедансными регуляторами перемещения электродов и с П-регуляторами в каждой фазе. С помощью разработанных моделей получены графики изменения мгновенных значений фазных токов и напряжений дуг в нормальном режиме работы дуговой сталеплавильной печи. С помощью разработанной модели получена оценка влияния изменения задания полного импеданса дуги на электрические координаты дуговой сталеплавильной печи. Доказано, что данная модель реагирует на приложенные к ней внешние воздействия путём изменения импеданса в соответствии с характеристиками дуговой сталеплавильной печи. Практически подтверждено, что диапазон значений длин дуг в процессе плавки находится в интервале от 0,2 м до 0,7 м, что подтверждается исследованиями других авторов.

Розроблено модель електричного трифазного ланцюга дугової сталеплавильної печі, що дозволяє врахувати нелінійність електричних дуг. Розроблено модель системи управління приводом переміщення електродів дугової сталеплавильної печі з імпедансними регуляторами переміщення електродів і з П-регуляторами в кожній фазі. За допомогою розроблених моделей отримано графіки зміни миттєвих значень фазних струмів і напруг дуг в нормальному режимі роботи дугової сталеплавильної печі. За допомогою розробленої моделі отримана оцінка впливу зміни завдання повного імпедансу дуги на електричні координати дугової сталеплавильної печі. Доведено, що дана модель реагує на докладені до неї зовнішні впливи шляхом зміни імпедансу відповідно до характеристик дугової сталеплавильної печі. Практично підтверджено, що діапазон значень довжин дуг в процесі плавки знаходиться в інтервалі від 0,2 м до 0,7 м, що підтверджується дослідженнями інших авторів.

A model of the three-phase electric circuit of electric arc furnace was developed. It allows to take into account the nonlinearity of electric arcs. A model of an management system by the movement driven of electrodes of the electric arc furnace with impedance movement regulators of the electrodes and with P-regulators in each phase. The models proposed graphics of change of the instantaneous values of the phase currents and voltages of the arcs in normal operation of the electric arc furnace. Using the model developed an estimate of the estimation of influence of change of value of the reference total impedance of the arc on the electric coordinates of the electric arc furnace. It is proved that this model reacts to applied external influences by the change of value of the reference impedance of the arc according to the characteristics of the electric arc furnace. Practically confirmed that the range of the lengths of the arcs during the melting process is in the range from 0.2 meter to 0.7 meter. It is supported by studies of other authors.

Лютая А. В.

канд. техн. наук, ст. преп. ДГМА,
neytiri77@mail.ru

Картамьшев Д. А.

студент ДГМА,
dima_kartamyshev@ukr.net

ДГМА – Донбаская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.365.2

Лютая А. В., Картамышев Д. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАДАНИЯ ИМПЕДАНСА НА ВЕЛИЧИНУ ДЛИНЫ ДУГИ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Дуга в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) переменного тока сравнительно короткая (обычно менее 0,3 м) и непрерывно флуктуирует в пространстве. Небольшая длина дуги создает условия для частых эксплуатационных коротких замыканий при обвалах шихты, повышенной колебательности режима печи и значительному негативному влиянию на качество электроэнергии энергосистемы. Дуга в период расплавления горит со значительными паузами, что является причиной существенного отклонения кривой тока от синусоиды и генерирования в электрической цепи печи гармонических составляющих самых различных частот. Это обстоятельство может привести к возникновению резонансных явлений в системах электроснабжения печей с устройствами компенсации реактивной мощности и выходу из строя электрооборудования печей. Повышению устойчивости горения дуги и ослаблению перечисленных эффектов способствует использование на современных печах повышенных длин дуг (до 0,7 м) за счет значительного повышения напряжения и применения дополнительных реакторов [1].

Эта весьма актуальная задача решается путем детального изучения технологического процесса плавки, построения адекватных математических моделей объекта управления, измерительных и управляющих устройств и их использования при синтезе системы автоматизированного управления привода перемещения электродов (САУ ППЭ) [1–3].

Целью работы является исследование влияния изменения входного задания на САУ ППЭ на длину дуги.

Для достижения поставленной цели необходимо для начала разработать модель САУ ППЭ ДСП и провести с ее помощью необходимые исследования.

Автоматизированная система регулирования перемещения электродов ДСП состоит из электрической цепи и системы управления приводом перемещения электродов ДСП.

При разработке моделей были приняты следующие допущения:

- активные и реактивные фазные сопротивления всех элементов короткой сети, кроме электрических дуг, не зависят от тока, имеют постоянные значения и симметричны;
- проводимости электрических дуг зависят от токов и изменяются во времени в соответствии с уравнениями Касси;
- сеть считаем идеальным источником синусоидального напряжения.

Разработаем математическую модель трёхфазной электрической цепи ДСП.

Существуют различные подходы для расчета как однофазных, так и трехфазных цепей ДСП. Самым несложным с точки зрения трудоёмкости вычислений способом расчёта является замена дуги регулируемым активным сопротивлением [1]. При этом нелинейность дуги не учитывается, а вычисления упрощаются.

Другой метод, предложенный С. И. Тельным [2] заключается в том, что мгновенные значения напряжения дуги за время ее горения в каждом полупериоде принимаются равными постоянному значению. При этом форма кривой напряжения дуги имеет прямоугольный вид. Такой учет нелинейности дуги переменного тока усложняет расчеты, но в то же время позволяет получать более близкие к действительности результаты.

Метод гармонического анализа заключается в разложении напряжений и тока дуги в тригонометрический ряд. При этом выясняется роль высших гармоник тока и напряжения в цепи, их влияние на параметры установки, работу измерительных аппаратов и т. п. [2, 3].

Несмотря на то, что дуговые печи применяются и совершенствуются уже много лет, моделирование подобных ситуаций остаётся крайне сложным.

Ряд исследователей, например, Montanari G. C., Loggini M., Cavallini A., Varadan S., Makrwn E. B., Girgis A. A., Collantes R., Gomez T., применяют стохастические модели для описания работы дуговых электропечей, опираясь, на первый взгляд, на случайный характер нагрузки [4–6].

В данной работе для расчёта цепей с дугами используется методика, основанная на применении нелинейных дифференциальных уравнений, которые позволяют точно и адекватно описывать поведение электрических цепей с дугами.

Электрическую часть дуговой печи можно представить эквивалентной электрической схемой, показанной на рис. 1.

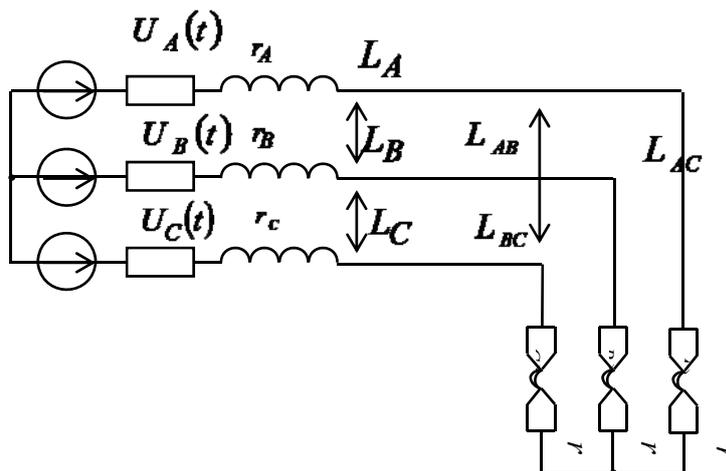


Рис.1. Эквивалентная схема замещения трёхфазной цепи с дугами

Следуя предложенной методике для трёхфазной цепи, соединённой в «звезду», каждая фаза которой содержит электрическую дугу можно записать систему уравнений [7]:

$$\left. \begin{aligned} U_A(t) &= r_A \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{AB} \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + L_{AC} \cdot \frac{di_C(t)}{dt} + \frac{i_A(t)}{g_A(t)}; \\ U_B(t) &= r_B \cdot i_B(t) + L_B \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + L_{AB} \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{BC} \cdot \frac{di_C(t)}{dt} + \frac{i_B(t)}{g_B(t)}; \\ U_C(t) &= r_C \cdot i_C(t) + L_C \cdot \frac{di_C(t)}{dt} + L_{AC} \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{BC} \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + \frac{i_C(t)}{g_C(t)}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – мгновенные значения токов дуг; $g_A(t)$, $g_B(t)$, $g_C(t)$ – проводимости дуг.

Для решения системы (1) нелинейных дифференциальных уравнений в программной среде MatLab Simulink воспользуемся матричным методом. Для этого приведем систему уравнений (1) к виду системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} L_A \frac{di_A(t)}{dt} + L_{AB} \frac{di_B(t)}{dt} + L_{AC} \frac{di_C(t)}{dt} &= U_A(t) - r_A i_A(t) - \frac{i_A(t)}{g_A(t)}; \\ L_{AB} \frac{di_A(t)}{dt} + L_B \frac{di_B(t)}{dt} + L_{BC} \frac{di_C(t)}{dt} &= U_B(t) - r_B i_B(t) - \frac{i_B(t)}{g_B(t)}; \\ L_{AC} \frac{di_A(t)}{dt} + L_{CB} \frac{di_B(t)}{dt} + L_C \frac{di_C(t)}{dt} &= U_C(t) - r_C i_C(t) - \frac{i_C(t)}{g_C(t)}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\frac{di_A(t)}{dt}$, $\frac{di_B(t)}{dt}$, $\frac{di_C(t)}{dt}$ – неизвестные, которые необходимо найти.

Составим матрицу коэффициентов, вектор свободных членов и столбец решений системы (3):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{AB} & L_B & L_{BC} \\ L_{AC} & L_{BC} & L_C \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} U_A(t) - r_A i_A(t) - \frac{i_A(t)}{g_A(t)} \\ U_B(t) - r_B i_B(t) - \frac{i_B(t)}{g_B(t)} \\ U_C(t) - r_C i_C(t) - \frac{i_C(t)}{g_C(t)} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_A(t)}{dt} \\ \frac{di_B(t)}{dt} \\ \frac{di_C(t)}{dt} \end{bmatrix}.$$

Для решения системы уравнений в математическом программном пакете MatLab Simulink организовываются матрица \mathbf{A} коэффициентов и вектор \mathbf{B} свободных членов уравнений системы (3). С использованием блока LU Solver стандартной библиотеки Library Browser математического программного пакета MatLab Simulink получаем решение системы – вектор \mathbf{X} , то есть производные фазных токов. После интегрирования производных токов получаем необходимые токи [7].

На рис. 2 в программной среде MatLab Simulink приведена структура математической модели трёхфазной электрической цепи ДСП.

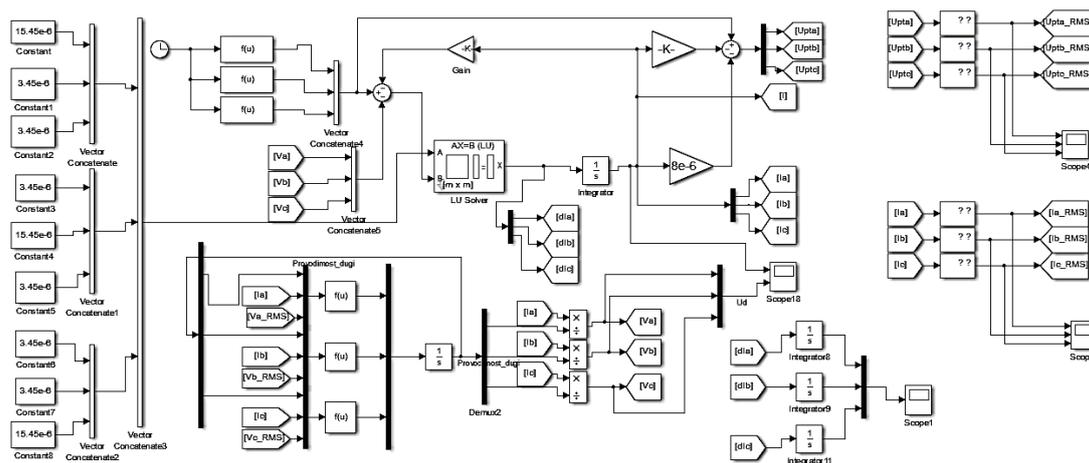


Рис. 2. Структура математической модели трёхфазной электрической цепи ДСП в программной среде MatLab Simulink

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

Преимущество применения импедансного РПЭ заключается в том, что при исчезновении напряжения на печи (отключение главного выключателя) сигнал разбаланса в плечах тока и напряжения регулятора отсутствует и электроды неподвижны. Также импедансный регулятор позволяет осуществить автоматический пуск печи, поскольку в момент соприкосновения первого электрода с шихтой напряжение становится малым и регулятор останавливает электрод. При подходе второго электрода зажигаются дуги в двух фазах печи.

При импедансном регулировании с увеличением силы тока в одной из фаз перемещения электродов остальных фаз значительно меньше (или совсем отсутствуют), так как увеличение силы тока двух других фаз сопровождается одновременным повышением напряжений в них (вследствие «перекоса» звезды напряжений). Чувствительность импедансного регулятора выше, чем у токового регулятора при прочих равных условиях, так как одновременно с увеличением силы тока снижается напряжение соответствующей фазы, и наоборот.

На рис. 3 представлена модель системы управления приводом перемещения электродов ДСП, выполненная в MatLab Simulink с импедансными регуляторами перемещения электродов для одной фазы. Для двух других фаз схемы имеют такой же вид. Параметром регулирования в данном регуляторе является полное сопротивление дуги – сопротивление короткой сети, электрода и дуги.

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 [7].

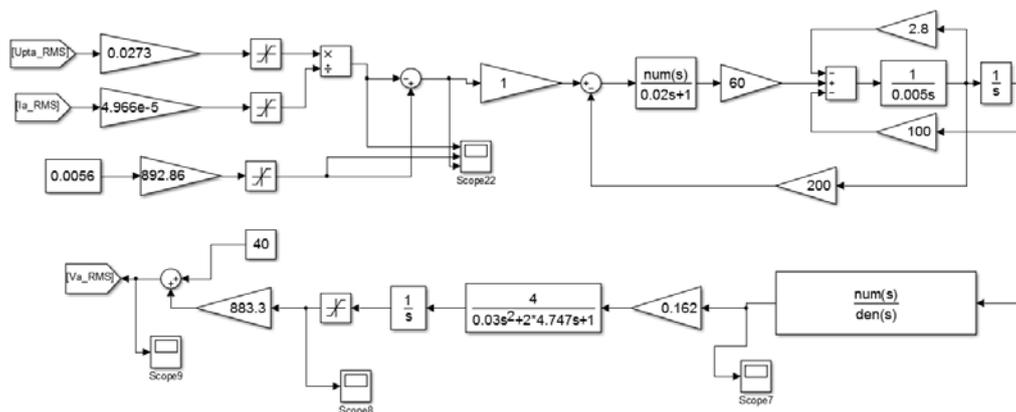


Рис. 3. Структурная математическая модель системы управления приводом перемещения электродов ДСП в программной среде MatLab Simulink

При этом используются сигналы мгновенных значений фазных токов (см. рис. 4) и действующих значений напряжений дуг, определяются проводимости дуг и сигналы мгновенных значений напряжений дуг (см. рис. 5).

Решая данную систему матричным способом с помощью программной среды MatLab Simulink, получили токи, которые по своим параметрам соответствуют техническим данным. Скачок тока в начальный период времени свидетельствует о запуске системы.

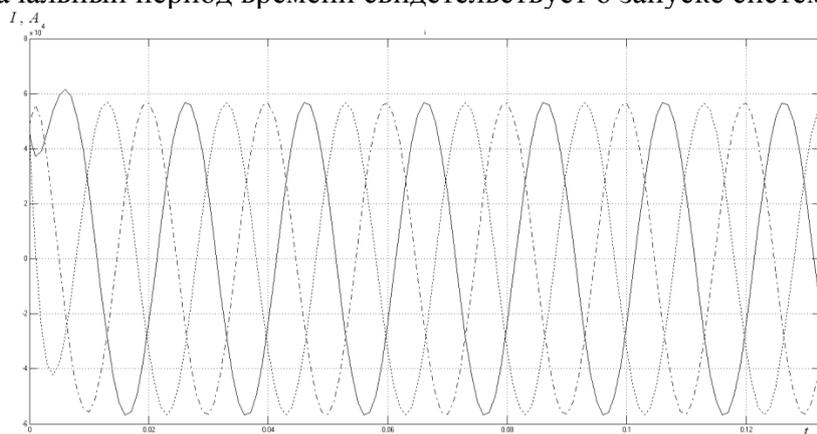


Рис. 4. Мгновенные значения фазных токов

В процессе расплавления шихты необходимо менять задание импеданса с целью как можно более эффективного расплавления металла в тот или иной момент расплавления. Поэтому важно проверить реакцию разработанной модели САУ ПЭ ДСП на изменение импеданса.

В программной среде MATLAB Simulink используем элементы Step, Add, Switch и формируем ступенчатое воздействие на вход системы для изменения значения импеданса. Это позволяет нам влиять в результате на величину длины дуги, тем самым изменяя подводимую мощность к печи. Формируем три различных ступени. Окончательный вид исследуемой модели представлен на рис. 6.

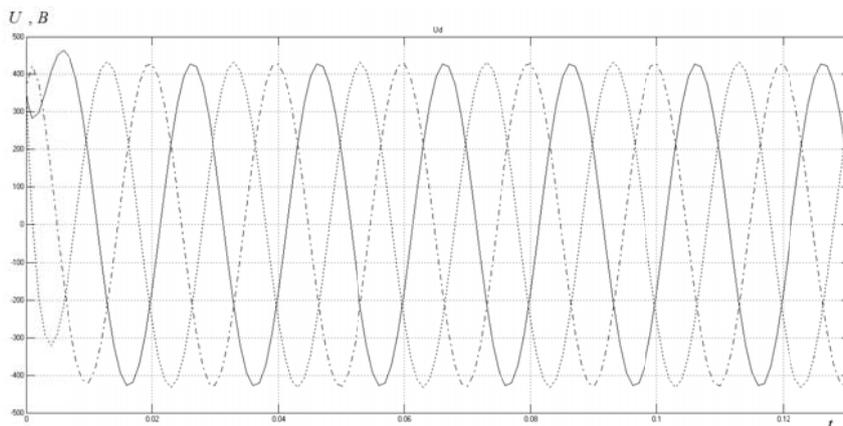


Рис. 5. Мгновенные значения напряжений дуг

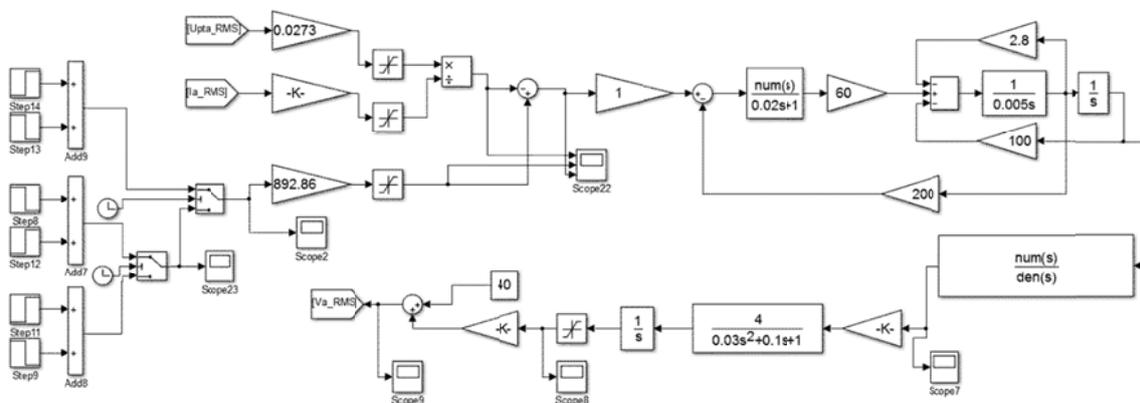


Рис. 6. Структура математической модели СУ ППЭ ДСП в программной среде MATLAB Simulink, предназначенная для исследования входных ступенчатых воздействий

Верхний и нижний фронт ступенчатого сигнала формируется в блоке Step программного приложения Simulink. В дальнейшем сигналы суммируются и подаются на блок Switch, в котором формируем длительность ступенчатого воздействия. В ходе исследования были получены оптимальные зависимости длины дуги от значения импеданса. Первая ступенька формируется путём увеличения входных данных на 66 % на 40-ой секунде процесса. При дальнейшем увеличении задания, приводящего к увеличению дуги, произойдёт обрыв дуги. Для подачи второго сигнала, на 70-ой секунде уменьшили значение импеданса на 18 %. Третью ступеньку формируем на 105-ой секунде, увеличив входную величину на 34 %. На рис. 7 представлен график изменения задания импеданса дуги на САУ ППЭ ДСП.

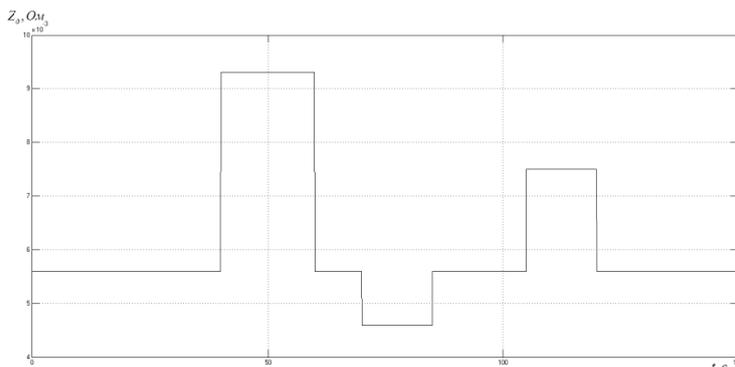


Рис. 7. График изменения задания импеданса дуги на САУ ППЭ ДСП

На рис. 8 представлен график изменения длины дуги при подаче ступенчатого воздействия на вход системы.

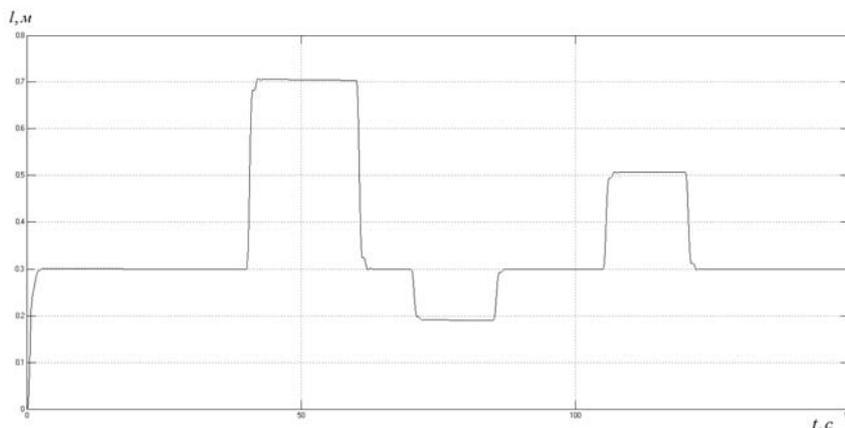


Рис. 8. График изменения длины дуги при подаче ступенчатого воздействия на вход системы

ВЫВОДЫ

Таким образом, была разработана модель автоматизированной системы управления перемещением электродов ДСП, которая позволяет проводить исследования моделирования различных возмущающих воздействий и искать пути их компенсации.

В процессе исследования системы СУ ППЭ ДСП мы выяснили, что данная модель реагирует на приложенные к ней внешние воздействия путём изменения импеданса в соответствии с характеристиками ДСП. Практически подтверждено, что диапазон значений длин дуг в процессе плавки находится в интервале от 0,2 м до 0,7 м, что подтверждается исследованиями других авторов [1, 2, 7].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свенчанский А. Д. *Электрические промышленные печи : Дуговые печи и установки специального нагрева : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп.* / А. Д. Свенчанский – М. : Энергоиздат, 1981. – 296 с., ил.
2. 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. 48–51.
3. Сисоян Г. А. *Электрическая дуга в электрической печи. 3-е изд.* / Г. А. Сисоян. – М. : Металлургия, 1974. – 304 с.
4. Montanari G. C., Loggini M. e. a. // *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8. № 4, 1994. – P. 2026-2036.
5. Varadan S., Makrwn E. B., Girgis A. A. // *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 1. № 3, 1996. – P. 1685–1691.
6. Collantes R., Gomez T. // *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12. № 4, 1997. – P. 1812–1817.
7. Панкратов А. И. *Оценка электромеханических возмущений в силовых цепях дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 при эксплуатационных коротких замыканиях* / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева. // *Вестник Кременчугского Национального технического университета. Вып.3, ч. 1. – Кременчуг, 2009. – С. 231–234.*