

А.В.Фомин, (4872) 35-14-82,
mpf-tula@rambler.ru, (Россия, Тула, ТулГУ)

ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Предлагается имитационная модель ДСП, включающая в себя математические модели электрической дуги и регулятора реактивной мощности. В предложенной модели ДСП, для моделирования дуги используется уравнение Касси (1) [1]. Данное уравнение используется во многих работах [2,3], но кроме модели электрической дуги необходимо учитывать параметры регуляторов мощности ДСП и особенности плотности гармонического распределения тока конкретной ДСП при различных этапах плавки. Данный факт был учтен при моделировании ДСП. Точное соответствие плотности гармонического распределения тока моделируемой ДСП реальной ДСП необходимо для синтеза параметров системы управления компенсирующих устройств.

Ключевые слова: имитационная модель, дуговая сталеплавильная печь, электрическая дуга, реактивная мощность.

Ряд исследователей применяют теоретические модели проводимости электрической дуги, приводящие к дифференциальным уравнениям, связывающие ток и напряжения. Наибольшее распространение получила уравнение Касси (1) для проводимости дуги:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \cdot \left(\frac{i^2}{U_0^2 \cdot g} - g \right), \quad (1)$$

где g - проводимость дуги; i - мгновенное значение тока дуги; U - действующее значение напряжения на дуге; Θ - постоянная времени проводимости дуги.

Неизвестная постоянная времени Θ может быть подобрана на основе сравнения вольт-амперных характеристик, рассчитанных для различных периодов плавки, полученные экспериментально по приближенному совпадению их форм. По результатам такого сопоставления $\Theta = 100\text{мкс}$ в начале расплавления, $\Theta = 600\text{мкс}$ к концу расплавления, $\Theta = 2000\text{мкс}$ в период окисления, $\Theta = 5000\text{мкс}$ в период рафинирования [4].

Учитывая, что возмущения электрического режима происходят под влиянием значительного числа независимых факторов, можно предположить, что суммарный закон распределения напряжений близок к нормальному [2]. Отдельные реализации нормально распределенной величины U могут быть получены по следующей зависимости:

$$U_i = U_i + \sigma_i \cdot \xi_i, \quad (2)$$

где U_i - математическое ожидание действующих значений напряжений дуг, σ_i - среднеквадратичное отклонение ξ_i - одно из значений нормально распределенной случайной величины X с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1.

Теперь ясно, что, задаваясь действующим значением напряжения на дуге из опыта измерения этой величины, можно, дополняя уравнением (2)

уравнениями электрической цепи, единым образом рассчитать электрические режимы в различных технологических периодах плавки.

Рассмотрим регулятор системы автоматического регулирования ДСП. Наилучшими показателями обладает система управления ДСП с гидравлическим механизмом [8]. Дифференциальные уравнения для этой системы управления записываются следующим образом:

$$6.4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d^5 y(t)}{dt^5} + 1.6384 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d^4 y(t)}{dt^4} + 2.9184 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + 0.256 \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} = 2.02 \cdot \frac{dx(t)}{dt} + 10.1x(t). \quad (3)$$

После преобразования Лапласа уравнения (3) получим следующую передаточную функцию:

$$W_P(p) = \frac{K(\tau_{ЭГ} \cdot p + 1)}{p(T_1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_1 \cdot \xi_1 \cdot p + 1)(T_2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_2 \cdot \xi_2 \cdot p + 1)}, \quad (4)$$

где K -коэффициент усиления исполнительного механизма перемещения электродов; T_M - эквивалентная постоянная времени механизма перемещения электродов; $1/T_K$, $1/T_1$, $1/T_2$ – собственные частоты недемпфированных колебаний исполнительных механизмов; $\tau_{ЭМ}$, $\tau_{ЭГ}$ - постоянные затухания; ξ_K , ξ_1 , ξ_2 - относительные коэффициенты затухания колебаний [5].

После проведения преобразований для САР можно получить параметры передаточных функций, соответствующие наименьшей инерционности привода T_M и постоянной времени колебательных звеньев T_j . Данным условиям соответствуют граничные коэффициенты усиления: $K = 10,1c^{-1}$; $\xi_1 = \xi_2 = 0,8$; $T_1 = T_2 = 0,08c$; $\tau_{ЭГ} = 0,2c$ [6].

Математическая модель ДСП как объекта автоматического управления содержит два канала: по току - с передаточным коэффициентом K_I и по напряжению K_U . Для моделирования ДСП используется график (рис. 1) [7] зависимости передаточного коэффициента по напряжению K_U от фазного тока ДСП.

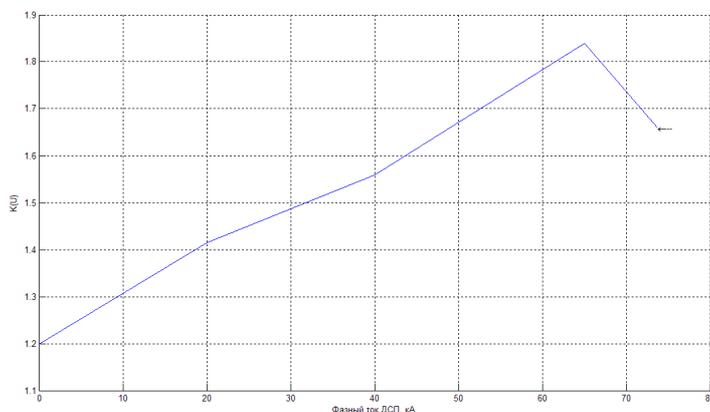


Рис. 1. Зависимость передаточного коэффициента K_U от тока фазного тока ДСП I_a , используемая при моделировании ДСП

На рис. 2 представлена блок-схема электроснабжения (ЭС) ДСП. Блок-схема ЭС ДСП состоит из стандартных блоков Electroprechnoy transformator (электропечной трансформатор), Preobrazovatel (измерительный орган), Volmetr (осциллограф), Seriesniy reactor (серийный реактор), kortkaya set (короткая сеть представлена стандартным блоком Mutual inductance, позволяющим учесть взаимную индуктивность, возникающую между фазами короткой сети).

На рис. 3 представлена блок-схема одной фазы блока arc furnase (рис. 2). На рис. 4 представлен блок one phase of arc furnase. Входными сигналами данного блока являются мгновенное значение тока одной фазы ДСП (I_{in}) и мгновенное значение напряжения на дуге (U). Входной сигнал U идет в блок arc, в котором реализуются уравнение Касси (1) и вспомогательное выражение (2). Уравнение дуги (1) реализуется в блоке arc при помощи алгебраического контура. Также входной сигнал U проходит через блок RMS2, в котором вычисляется эффективное значение напряжения на дуге. Затем полученный сигнал сравнивается с уставкой напряжения (U_{ust}) при помощи сумматора. Полученная разность умножается на коэффициент усиления по напряжению K_U при помощи блока product8. Выходное значение блока product8 проходит через передаточную функцию (Transfer Fcn) регулятора мощности (выражение 5) и является входным сигналом блока arc.

Для вычисления эффективного значения фазного тока ДСП используется блок стандартный блок RMS1, входом которого является входной сигнал I_{in} .

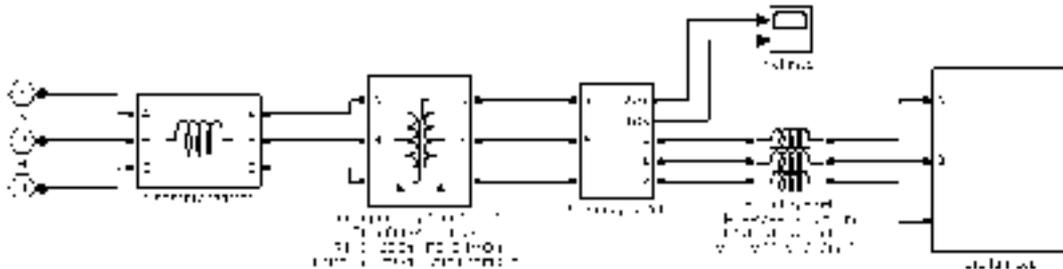


Рис. 2. Блок-схема электроснабжения ДСП

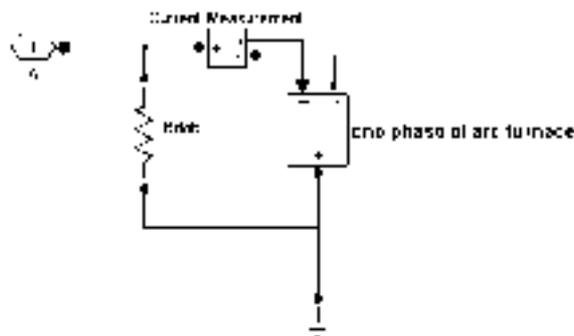


Рис. 3. Одна фаза блока arc furnase

Представленная на рис. 5 вольтамперная характеристика (ВАХ) дуги фазы А для стадии рафинирования ДСП-50, полученная при моделировании, характерна для рассмотренной стадии плавления.

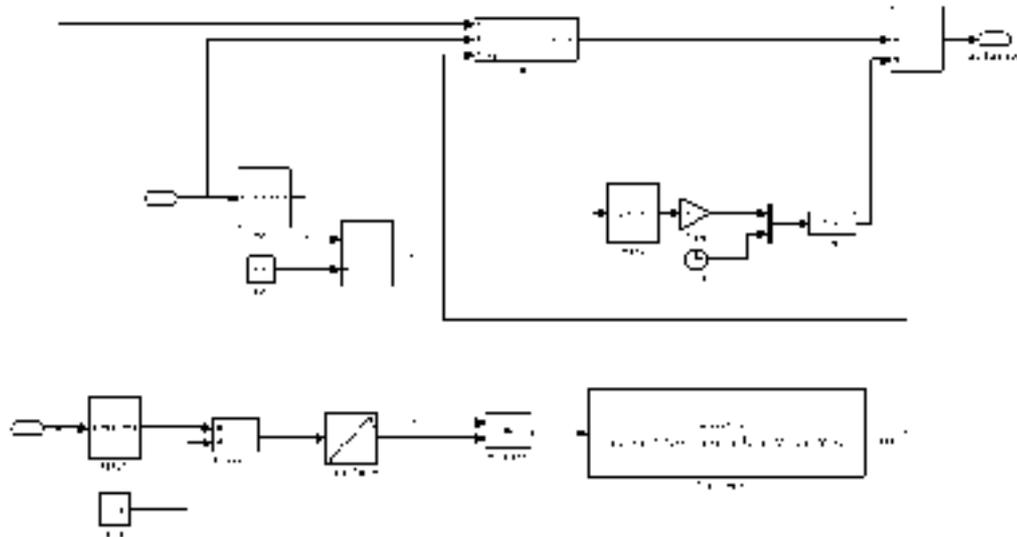


Рис. 4. Блок-схема one phase arc furnace

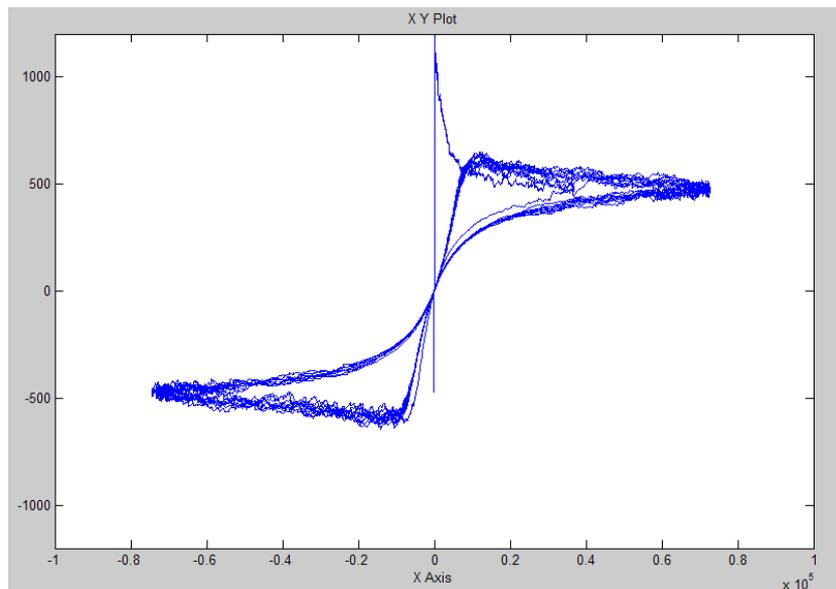


Рис. 5. Вольтамперная характеристика дуги фазы А для стадии рафинирования ДСП-50, полученная при моделировании

Рассмотрим результаты компьютерного моделирования и сравним с результатами реального объекта. В качестве примера рассмотрим работу ДСП-50 в стадии рафинирования (рис. 6-9).

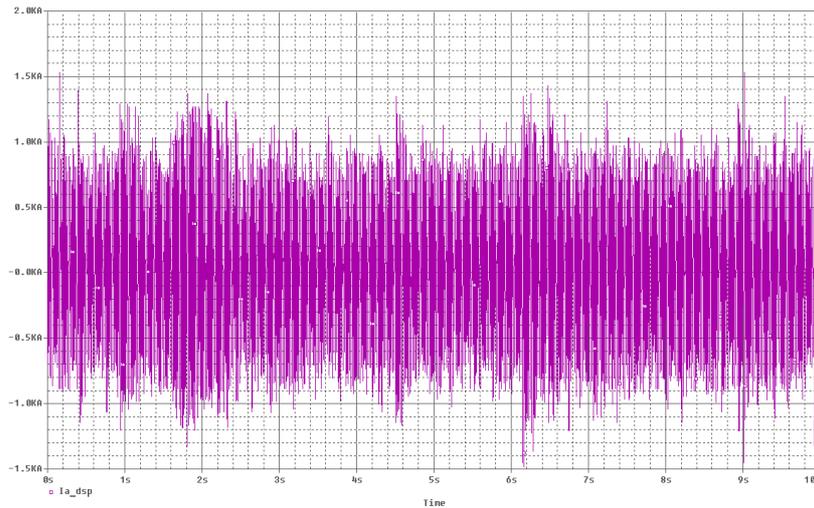


Рис. 6. Измеренный ток ДСП фазы А на высокой стороне электропечного трансформатора для ДСП-50

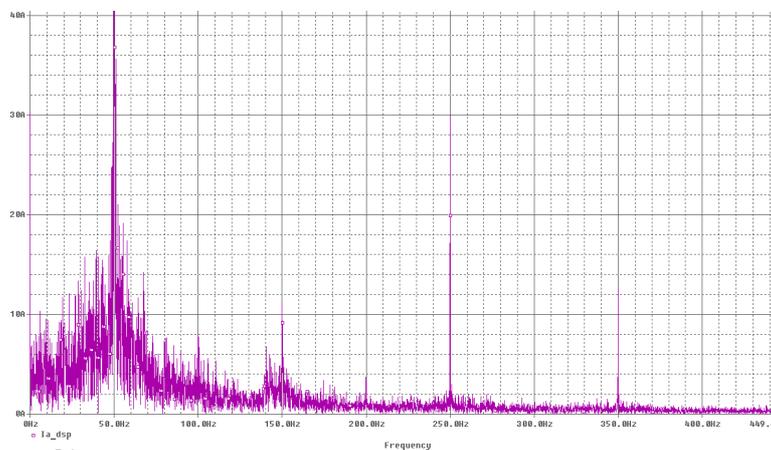


Рис. 7. Преобразование Фурье для измеренного тока ДСП фазы А на высокой стороне электропечного трансформатора для ДСП-50

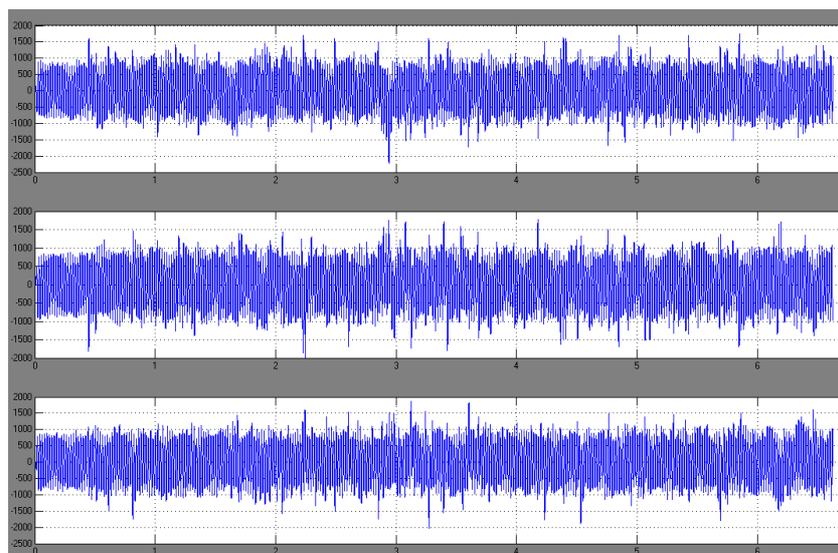


Рис. 8. Токи, полученные с помощью моделирования ДСП на высокой стороне электропечного трансформатора для ДСП-50

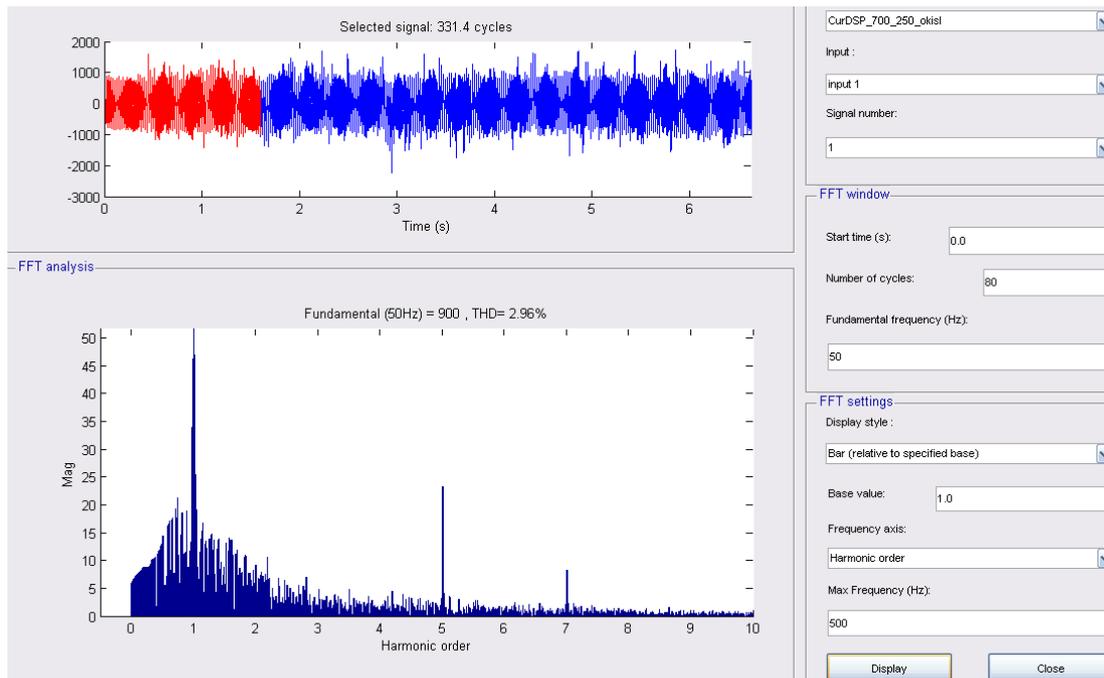


Рис. 9. Преобразование Фурье для тока ДСП фазы А на высокой стороне электропечного трансформатора для ДСП-50, полученный при моделировании

Как видно из рис. 7, 9 наиболее существенное значение среди высших гармоник имеют третья, пятая и седьмая.

Сравнение амплитудных значений токов первой, третьей, пятой и седьмой гармоники, полученных при моделировании и снятых непосредственно с реального объекта приведены, в таблице.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для фазы А

Амплитудные значения тока	1-я (50 Гц) гармоника	3-я (150 Гц) гармоника	5-я (250 Гц) гармоника	7-я (350 Гц) гармоника
Расчетные, А	900	8	21	9.5
Экспериментальные, А	850	8.5	20	10

Из результатов компьютерного моделирования нестационарных электрических процессов дуговой сталеплавильной печи и сравнительного анализа экспериментальных данных с расчетными на 45 экспериментах при различных стадиях плавки следует, что расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 10,5 %. Если учесть тот факт, что

величина высших гармонических составляющих связана с ходом технологического процесса и зависит от ряда факторов, можно считать, что расхождение расчетных и экспериментальных данных в 10,5 % допустимо.

Библиографический список

1. Cassie A.M. «A new Theory of Arc Rupture and Circuit Severity»// CIGRE, 1939, №102, P.1-14

2. Карпенко С.В. Математическое моделирование нестационарных электрических процессов в электротехнических системах на основе численных методов вейвлет-анализа: автореферат дис... канд. техн наук. Новокузнецк, 2006

3. Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. Л.: Энергия, 1987. 160 с.

4. Хаинсон А.В. Развитие методов расчета и оптимизации электрических параметров и режимов работы дуговых сталеплавильных печей на основе автоматического проектирования. М.: ВНИИЭТО, 1983.

5. Капитанов В.И., Наумов Е.А., Минеев Р.В. Анализ динамики работы САР ДСП с учетом механических колебаний электрода и случайного характера возмущений // Электротермия. 1974. №5 (141). С. 13-15.

6. Салтыков В.М. Электромагнитная совместимость и энергосберегающие режимы электротехнического комплекса «система электроснабжения – дуговая сталеплавильная печь: автореф. дис... д-ра. техн. наук. Тольятти, 2003.

7. Савицки А. Дуговая печь трехфазного тока как нелинейное звено автоматической системы регулирования мощности // Электричество. 2000, №2.

8. Салтыков А.В. Электромагнитная совместимость параллельных дуговых сталеплавильных печей с системой электроснабжения: автореф. дис... канд. техн. наук, Самара, 2006.

Fomin A.V.

Construction of imitating model arc the steel-smelting furnace

The imitating model DSP including matematiche-skie models of an electric arch and a regulator of jet capacity is offered. In offered model DSP, for arch modelling the equation of Kassi (1 [1] is used. The given equation is used in many works [2,3], but except model of an electric arch it is necessary to consider parametres of regulators of capacity DSP and features a raft-nosti of harmonious distribution of a current concrete DSP at various stages of fusion. The given fact has been considered at modelling DSP. Exact conformity a raft-nosti of harmonious distribution of a current modelled DSP real DSP neobho-dimo for synthesis of parametres of a control system of compensating devices.

Получено 05.08.09