

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГЕ

Разживин А.В., Сердюк А.А.

Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск

E-mail: [app@digma.donetsk.com.ua](mailto:app@digma.donetsk.com.ua)

**Abstract.** *Razgivin A., Serdyk A. Simulation of power and power on an electrical arc. In a paper the technique of construction of a mathematical sample piece of identification of power and voltage on arcs of an arc steel furnace is considered. The diagrams of transient processes on voltage and power on an arc are obtained.*

**Постановка задачи исследований.** Наиболее важным элементом в электрическом контуре дуговой сталеплавильной печи (ДСП) является электрическая дуга, определяющая работу печи и характер процессов в электрическом контуре. Следовательно, актуально автоматическое регулирование параметров электрической дуги. Основным параметром электрической дуги является ее мощность, которая непосредственно влияет на интенсивность нагрева жидкого металла [1]. Обычно регулирование мощности осуществляется путем переключения ступеней напряжения на печном трансформаторе.

Контроль напряжения для его регулирования производится путем присоединения измерительной аппаратуры к шинам низкой стороны печного трансформатора. Однако вторичное фазное напряжение на печном трансформаторе не соответствует напряжению на дугах, что не дает возможности определять мощности на дугах. На действующих ДСП измерение и эксплуатационный контроль напряжения дуги затруднен, так как невозможен продолжительный электрический контакт измерительной аппаратуры с концом электрода и расплавленным металлом в печи.

Измерение таких величин как напряжение и мощность на дуге невозможно, поэтому необходима идентификация этих параметров по вторичному напряжению печного трансформатора и параметрам короткой сети. Это позволит осуществлять оперативный контроль и регулирование полезной мощности, выделяемой на дугах, путем умножения мгновенных значений тока и напряжения с последующим усреднением по времени.

Для мощных ДСП характерно, что действующее значение напряжения дуги практически постоянно при неизменной длине дуги, т.е. не зависит от действующего значения силы тока. В связи с этим для описания дуги в ДСП может быть использовано дифференциальное уравнение, которое связывает ток и падение напряжения на дуге [2, 5]:

$$T \frac{dg(t)}{dt} = \left[ \frac{i^2(t)}{U_o^2} - g^2(t) \right] \cdot g(t)^{-1}, \quad (1)$$

где  $T$  — постоянная времени дуги;  $i(t)$ ,  $g(t)$  — ток и проводимость дуги;  $U_o$  — действующее значение напряжения на дуге.

Однако это уравнение не характеризует зависимость изменения мощностей от напряжений на дугах. Для получения данной зависимости запишем уравнение (1) в операторной форме и домножим на  $U_o^2 R_o$ :

$$T_o \frac{U_o^2 R_o}{R_o^2} p = \frac{i U_o^2 R_o}{U_o^2} - \frac{U_o^2 R_o}{R_o^2}$$

Проведя некоторые преобразования получим:  $\frac{U_o^2 R_o}{R_o^2} (T_o p + 1) = i^2 R_c$ ,

где  $R_o = 1/g$  — сопротивление электрической дуги;  $P_o = U_o^2 / R_o$  — мощность на электрической дуге;  $i^2 R_c = P_c$  — мощность на ступени печного трансформатора.

Тогда:  $\frac{R_c P_o}{R_o} (T_o p + 1) = P_c$ , отсюда получаем передаточную функцию дуги по

мощности:

$$W^{дузи}(p) = \frac{P_o}{P_c} = \frac{\frac{R_o}{R_c}}{(T_o p + 1)} = \frac{\beta}{T_o p + 1},$$

или, исходя из условия  $\beta = \frac{U_o}{U_c} = \frac{R_o}{R_c}$  получаем:

$$W^{дузи}(p) = \frac{P_o}{U_o} = \frac{i}{T_o p + 1} \quad (2)$$

где  $\beta$  — относительное действующее напряжение на дуге, равное 0,4–0,6 в восстановительный период [3];  $T_o$  — постоянная времени дуги, при рафинировании составляет (3...8) мс [4].

В передаточной функции (2) величина напряжения на дуге неизвестна. Запишем систему уравнений, описывающих работу трехфазных цепей комплекса «ПЕЧЬ-КОВШ», без нулевого провода (см. рис. 1).

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 + i_2 + i_3 = 0; \\ U_{\phi 1} = U_{\phi 1} - i_1 r_1 + (L_1 - M_{12}) \frac{di_2}{dt} + (L_1 - M_{13}) \frac{di_3}{dt}; \\ U_{\phi 2} = U_{\phi 2} - i_2 r_2 + (L_2 - M_{21}) \frac{di_1}{dt} + (L_2 - M_{23}) \frac{di_3}{dt}; \\ U_{\phi 3} = U_{\phi 3} - i_3 r_3 + (L_3 - M_{32}) \frac{di_2}{dt} + (L_3 - M_{31}) \frac{di_1}{dt}; \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $U_{\phi}$  — фазное напряжение низкой стороны печного трансформатора;  $r$  — активное сопротивление вторичного токопровода;  $L$  — собственная индуктивность вторичного токопровода;  $M$  — взаимные индуктивности между фазами;  $\frac{di}{dt}$  — производная тока.

**Математические модели для идентификации, результаты моделирования.** Совместное использование системы уравнений (3) и передаточной функции дуги по мощности (2) позволяет реализовать математическую модель идентификации напряжения и мощности на дуге.

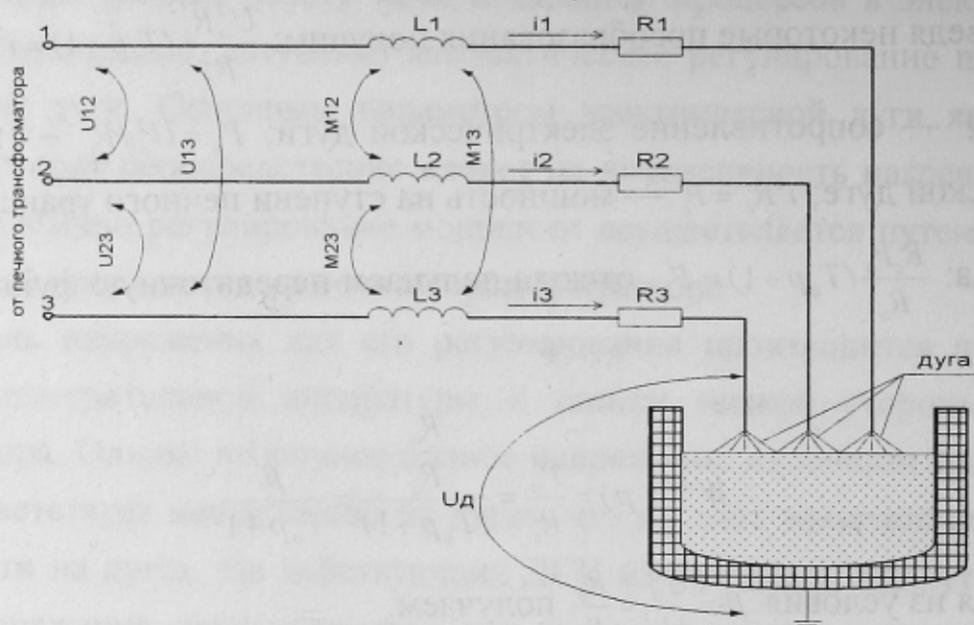


Рисунок 1 — Эквивалентная схема трехфазной сети ДСП

Моделирование величины мощности, выделяемой на дуге в зависимости от фазных напряжений и токов, производилось с помощью пакета MATLAB (Simulink). Данная модель представляет собой три последовательно соединенных блока:

- блок задания величин фазных напряжений и токов низкой стороны печного трансформатора (см. рис. 2);
- блок определения напряжения на дуге (рис. 3);

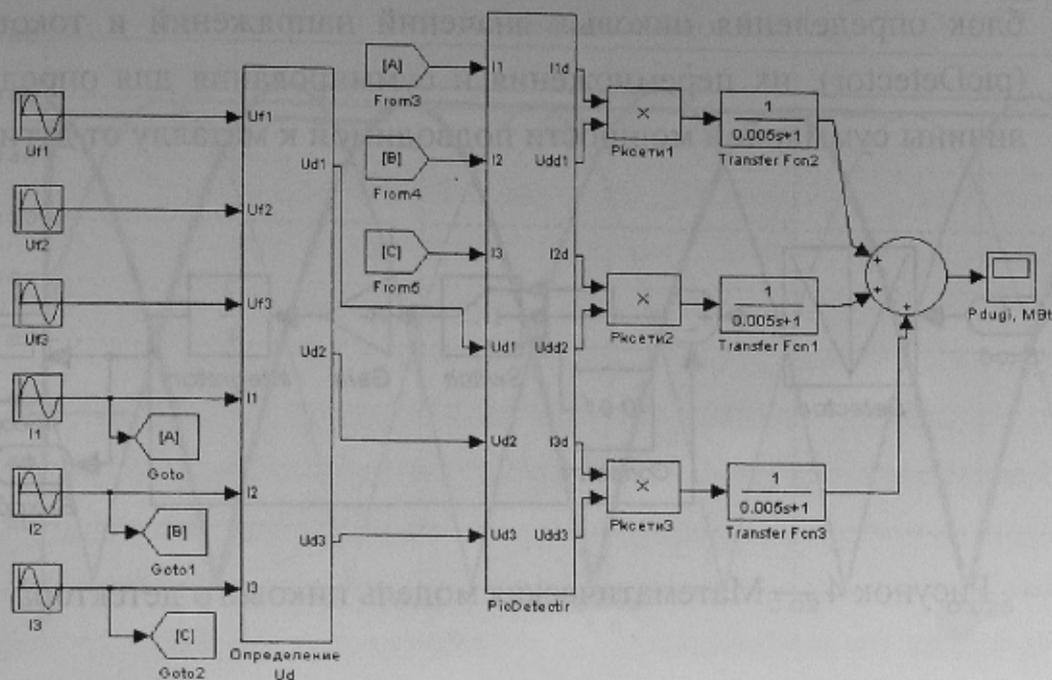


Рисунок 2 — Математическая модель идентификации мощности электрической дуги

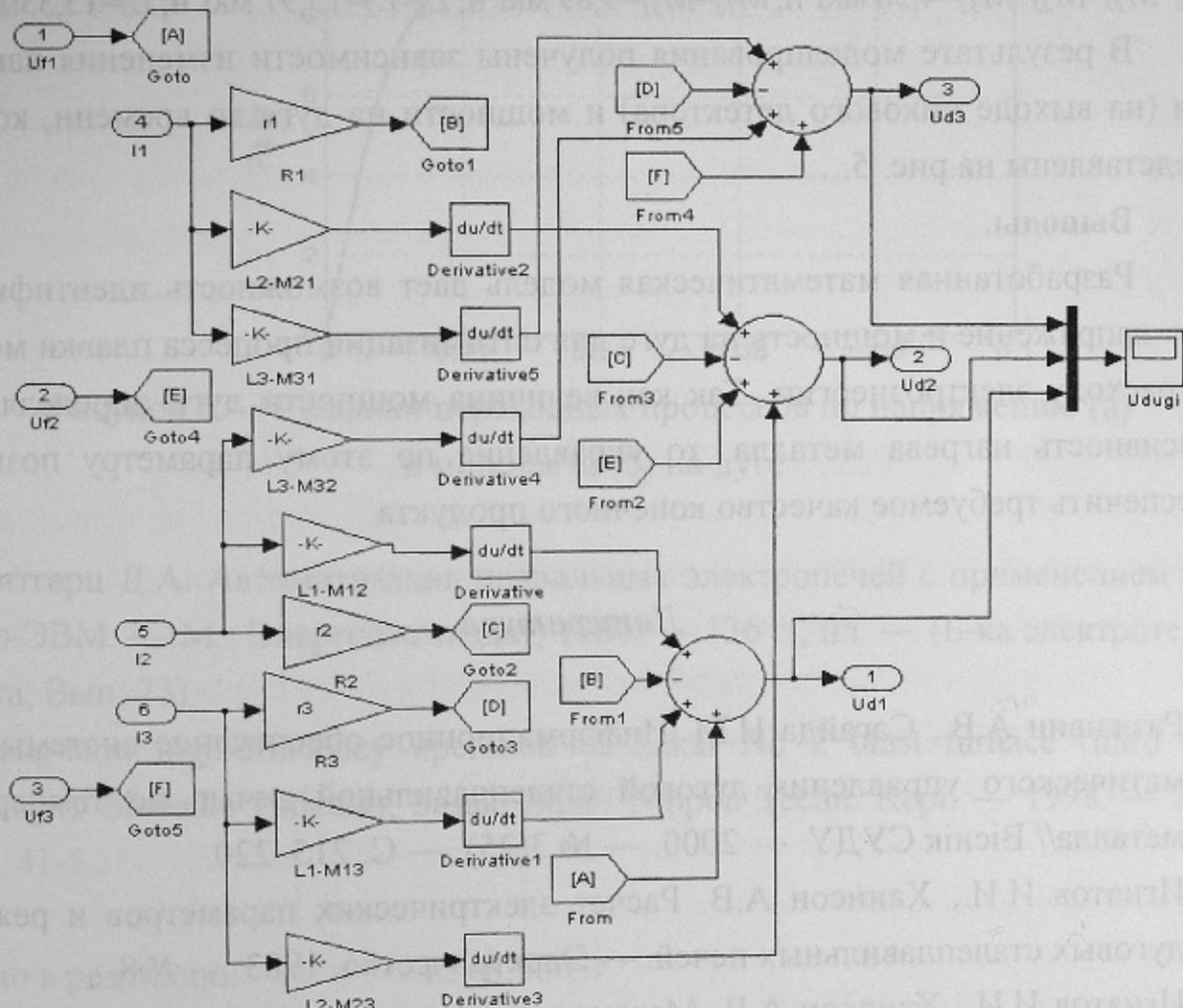


Рисунок 3 — Математическая модель идентификации напряжения электрической дуги

- блок определения пиковых значений напряжений и токов на дугах (picDetector), их перемножения и суммирования для определения величины суммарной мощности подводимой к металлу от дуги (рис 4).

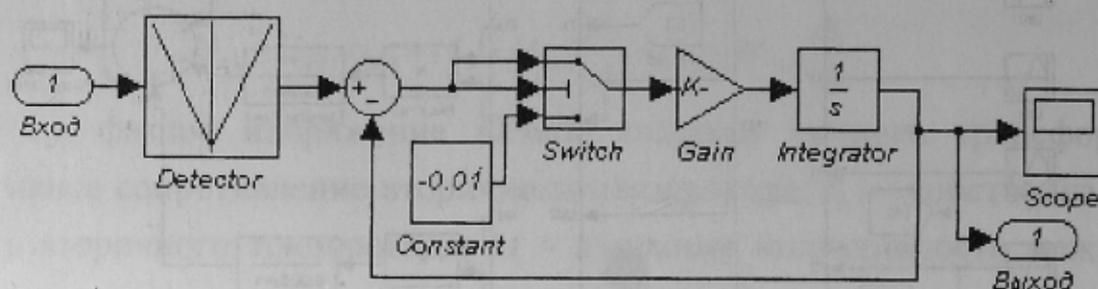


Рисунок 4 — Математическая модель пикового детектора

При моделировании использовались параметры короткой сети, экспериментально снятые на комплексе «ПЕЧЬ-КОВШ»:  $r_1=r_2=r_3=9,1$  мОм;  $M_{12}=M_{21}=M_{23}=M_{32}=4,58$  мкГн,  $M_{13}=M_{31}=3,89$  мкГн;  $L_1=L_2=15,97$  мкГн;  $L_3=15,33$  мкГн.

В результате моделирования получены зависимости изменения напряжения (на выходе пикового детектора) и мощности на дуге во времени, которые представлены на рис. 5.

### Выводы.

Разработанная математическая модель дает возможность идентифицировать напряжение и мощность на дуге для оптимизации процесса плавки металла по расходу электроэнергии. Так как величина мощности дуги определяет интенсивность нагрева металла, то управление по этому параметру позволяет обеспечить требуемое качество конечного продукта.

### Литература

1. Разживин А.В., Сагайда И.М. Информационное обеспечение системы автоматического управления дуговой сталеплавильной печью по температуре металла// Вісник СУДУ. — 2000. — № 3(25). — С. 215–220.
2. Игнатов И.И., Хаинсон А.В. Расчет электрических параметров и режимов дуговых сталеплавильных печей. — Электричество, 1983. — №8.
3. Игнатов И.И., Хаинсон А.В. Математическое моделирование электрических режимов дуговых сталеплавильных печей. — Электричество, 1985. — №8.

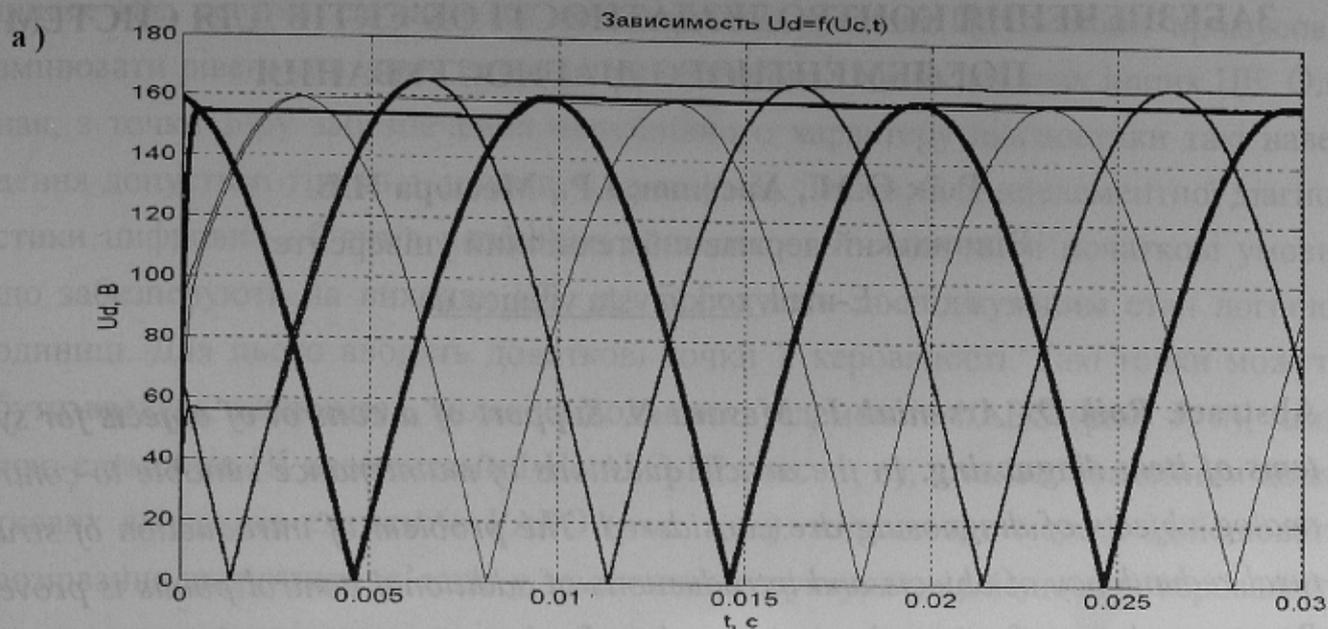


Рисунок 5 — Графики переходных процессов по напряжению (а) и мощности (б) на дуге

4. Гитгарц Д.А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 136 с., ил. — (Б-ка электротермиста; Вып. 73).
5. Long-term high-efficiency operation of Sakai No 2 blast furnace (third campaign)/ Shibaike Hidehari, Sasaki Shin// Nippon Techn. Rept. — 1998. — №43. P. 41-5.

Сдано в редакцию: 12.03.2003г.

Рекомендовано к печати: д.т.н., проф. Зори А.А.