

П.С. МАНУКЯН, А.М. АРУТЮНЯН

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
НИЗКОЧАСТОТНОЙ КАНАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

Рассмотрены математические модели и составные части установки – плавильная ванна, индукторный трансформатор, устройство электропитания, а также их связи. Модель отражает функциональные связи следующих параметров: геометрические размеры ванны, массу и характеристики шихты, динамическое омическое сопротивление шихты и расплава, электрическую мощность, параметры индукторного трансформатора.

Ключевые слова: канальная печь, шихта, сетевой трансформатор, динамическое омическое сопротивление, тиристорный регулятор напряжения.

Введение. Существуют различные способы электрического нагрева металлов – нагрев сопротивлением с выделением тепла в телах, включённых непосредственно в электрическую цепь; дуговой – с выделением тепла в электрической дуге; индукционный – с выделением тепла от протекания индуктированных переменных токов; способы, использующие электронно-ионные воздействия или электромагнитные излучения.

Наибольшее распространение для электроплавки металлов получили способы индукционного нагрева. Установки, применяемые в этом случае, подразделяются на два принципиально отличных класса:

- индукционные высокочастотные тигельные установки, где выделение тепла происходит от протекания наведённых вихревых токов в металле, помещённом в тигель, а также в самом тигле;
- низкочастотные канальные установки, где выделение тепла происходит от омического нагрева током, протекающим в короткозамкнутом витке, образованном массой металла, находящегося в непроводящей ванне.

Соответственно отличаются конструкции, электрические схемы питания, управления и технико-экономические характеристики процесса и установки.

Указанные вопросы особенно актуальны для установок малых и средних мощностей – от 3 до 20 кВт. Это объясняется следующим:

- маломощные установки получили развитие и распространение в последнее время и поэтому недостаточно совершенны;
- маломощные установки являются объектами индивидуального производства и частного бизнеса, для которых экономические характеристики имеют предпочтительное значение, а этому не уделялось достаточного внимания.

Предметом исследования в настоящей статье является математическая модель – опытный образец установки малой мощности – до нескольких десятков киловатт, предназначенный для малосерийного и индивидуального производства.

Математическая модель установки (рис.1) состоит из трех моделей ее составных частей: модель N1 – плавильная ванна, модель N2 – индукторный трансформатор, модель N3 – тиристорный регулятор напряжения.

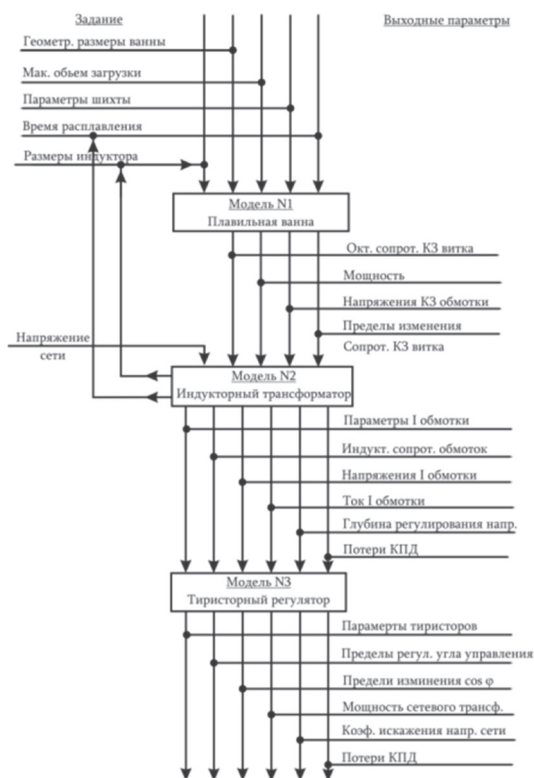


Рис. 1. Блок-схема математической модели канальной установки

В статье рассмотрена модель N2 – индукторный трансформатор. Схема замещения индукторного трансформатора приведена на рис. 2. Обозначения на схеме замещения: r_1 – активное сопротивление первичной обмотки, x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки, r_m – активное сопротивление потерь в магнитопроводе, x_m – индуктивное сопротивление намагничивания, x_2 – индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки, R – активное сопротивление нагрузки вторичной обмотки – короткозамкнутого витка, U_1 – напряжение первичной обмотки (напряжение сети), I_1 – ток первичной обмотки, E_m – электродвижущая сила (ЭДС)

намагничивания, I_0 – ток намагничивания (ток холостого хода), U_2 – напряжение вторичной обмотки (короткозамкнутого витка), I_2 – ток вторичной обмотки (короткозамкнутого витка).

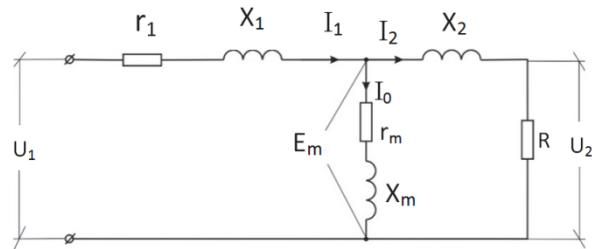


Рис. 2. Схема замещения индукторного трансформатора

Ввиду исключительной малости активного сопротивления вторичной обмотки (короткозамкнутого витка) индуктивные сопротивления обмоток приобретают относительно ощутимую величину, и ими пренебрегать недопустимо.

Активное сопротивление первичной обмотки до расчета трансформатора точно определить невозможно, учитывая определяющее влияние условий охлаждения и принятой плотности тока, а также величины первичного тока, которые точно определяются лишь после проектирования и испытаний.

Точный расчет индуктивных сопротивлений обмоток и индуктивного сопротивления рассеяния трансформаторов представляет значительные трудности [1,2]. Особенно это относится ко вторичной обмотке, которая представляет собой один короткозамкнутый виток.

Учитывая изложенные обстоятельства, индуктивные сопротивления проектируемого индукторного трансформатора определяются методом пересчета относительно существующего индукторного трансформатора близкой мощности и подобной конструкции, принятого в качестве базового, параметры которого конструктивно доведены до требуемого уровня. Параметры пересчета в дальнейшем могут быть приняты в качестве констант. (Параметры базового трансформатора далее обозначены индексом 0).

Базовый трансформатор подключается к сети в режиме холостого хода. Холостой ход имеет место при незагруженной в ванну шихте так, что не образуется короткозамкнутый виток вокруг магнитопровода трансформатора. Векторная диаграмма индукторного трансформатора при холостом ходе приведена на рис. 3. (Здесь и далее на векторных диаграммах относительные размеры векторов не соблюдены – для наглядности). Активная мощность базового трансформатора, забираемая от сети при холостом ходе, измеренная ваттметром, равна

$$P_0 = U_{10} I_{10} \cos \varphi_0 = I_{10}^2 (r_{10} + r_{m0}), \quad (1)$$

где U_{10} – напряжение первичной обмотки (напряжение сети); I_{10} – ток первичной обмотки, измеренный непосредственно амперметром; r_{10} – активное сопротивление первичной обмотки базового трансформатора, измеренное непосредственно омметром.

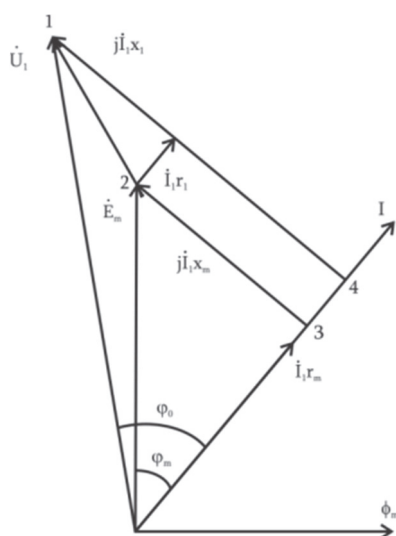


Рис. 3. Векторная диаграмма индукторного трансформатора при холостом ходе

Отсюда активное сопротивление потерь в магнитопроводе будет

$$r_{m0} = \frac{P_0}{I_{10}^2} - r_{10}. \quad (2)$$

Из треугольника 0-1-4 на векторной диаграмме рис.3 имеем

$$U_{10}^2 = [I_{10}(x_{10} + x_{m0})]^2 + [I_{10}(r_{10} + r_{m0})]^2. \quad (3)$$

Из треугольника 0-2-3:

$$E_{m0}^2 = U_{20i}^2 \left(\frac{W_1}{W_i} \right) = (I_{10} x_{m0})^2 + (I_{10} r_{m0})^2. \quad (4)$$

Для определения ЭДС намагничивания – E_{m0} , которая весьма мала по величине и неопределенна, выполняется следующее. На магнитопровод трансформатора в непосредственной близости от первичной обмотки наматывается однослойная измерительная обмотка (рис.4). Напряжение, измеренное на этой

измерительной обмотке при холостом ходе трансформатора, может быть принято в качестве относительной ЭДС намагничения – E_{m0} ; U_{20i} – напряжение, измеренное на измерительной обмотке; W_1 – известное количество витков первичной обмотки; W_i – количество витков измерительной обмотки. Индуктивные сопротивления базового трансформатора x_{10} и x_{m0} определяются решением уравнений (3), (4). (Аналитические решения здесь не приводятся.)

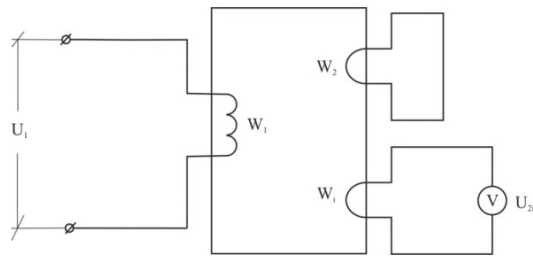


Рис. 4. Размещение измерительной обмотки на индукторном трансформаторе

Индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки x_{20} базового трансформатора определяется по результатам измерений при работе базового трансформатора под нагрузкой – при наличии в ванне шихте, образующей короткозамкнутый виток.

Векторную диаграмму индукторного трансформатора при нагрузке можно представить в упрощенном виде (рис.5), полагая, что активное сопротивление многовитковой первичной обмотки значительно меньше ее индуктивного сопротивления рассеяния, а ток намагничения холостого хода значительно меньше входного тока первичной обмотки [3,4]. При указанных допущениях можно принять, что векторы падений напряжения от первичного тока на сопротивлении x_{10} и от вторичного тока на сопротивлении x_{20} совпадают по фазе – находятся на одной прямой (см. рис.5).

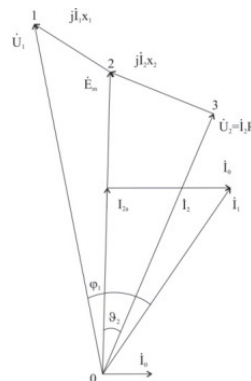


Рис. 5. Упрощенная векторная диаграмма индукторного трансформатора при нагрузке

Из треугольника 0-1-3 на векторной диаграмме рис.5 имеем

$$U_{10}^2 = (I_{10}x_{10} + I_{20}x_{20})^2 + (I_{20}R_0)^2, \quad (5)$$

где U_{10} – измеренное напряжение на входе первичной обмотки; I_{10} – входной ток первичной обмотки; I_{20} – ток вторичной обмотки (короткозамкнутого витка) – не контролируется; x_{20} – индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки; R_0 – активное сопротивление короткозамкнутого витка.

Из треугольника 0-2-3 на векторной диаграмме рис.5 имеем

$$E_{mon}^2 = U_{20i}^2 \left(\frac{W_1}{W_i} \right)^2 = (I_{20}x_{20})^2 + (I_{20}^2 R_0)^2, \quad (6)$$

где E_{mon} – ЭДС намагничения; U_{20i} – напряжение на измерительной обмотке.

Индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки x_{20} определяется решением уравнений (5), (6). (Аналитические решения здесь не приводятся).

В (5) и (6) параметры вторичного контура (короткозамкнутого витка) приведены к первичной обмотке. Реальные параметры вторичного контура базового трансформатора определяются, будучи пересчитанными посредством коэффициента пересчета, выраженного через коэффициент трансфор

$$I'_{20} = \left(\frac{W_1}{W_2} \right) I_2; I_2 = W_1 I_{20}; X'_{20} = \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^2 X_{20}; X_2 = \left(\frac{1}{W_1} \right)^2 X_{20}; R'_0 = \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^2 R_0; R_0 = \left(\frac{1}{W_1} \right)^2 R'_0. \quad (7)$$

где I'_{20} – реальный ток во вторичном контуре (в короткозамкнутом витке); x'_{20} – реальное индуктивное сопротивление вторичного контура; R_0 – реальное активное сопротивление короткозамкнутого витка; W_1 – количество витков первичной обмотки; $W_2 = 1$ – количество витков короткозамкнутого контура. В выражениях (5) и (6) и на векторных диаграммах (рис.5) реальное активное сопротивление короткозамкнутого витка определяется путем расчета по (7).

Произведено экспериментальное исследование (рис.6). Результаты измерений приведены в таблице.



Рис. 6. Опытный образец установки

Таблица

Результаты исследований

$V_1,$ B	$A_1,$ A	$W,$ Bm	$V_2,$ B	$\cos \varphi,$
10	10	71	0.08	0.71
20	12.5	180	0.16	0.72
30	18.5	400	0.24	0.72
40	31.1	930	0.32	0.75
50	40.2	1500	0.372	0.75
60	51.2	2334	0.44	0.76
70	62.3	3314	0.508	0.76
80	70.1	4318	0.56	0.77

Выводы

1. Преимущество предлагаемой низкочастотной индукционной печи по сравнению с классической канальной в том, что эта печь может работать в любом режиме, начиная с режима холостого хода и кончая режимом короткого замыкания. Кроме того, эту печь можно отключить, что невозможно сделать в случае классической канальной печи.

2. Недостатком низкочастотной индукционной печи является его сравнительно низкий коэффициент мощности, что обусловлено значительной дальностью между первичной обмоткой и шихтой. В связи с этим проведены исследования по улучшению коэффициента мощности низкочастотной канальной печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванова Л.И., Грובה Л.С., Сокунов Б.А.** Индукционные канальные печи: Учебное пособие для выполнения курсового проекта. –Екатеринбург: Издательство ГОУ УГТУ – УПИ, 2002. - 202с.
2. Արտոնագիր № 2533A F27D11/00. Խուղակավոր վառարան/**Ճ.Դ.Դավիդյան, Պ.Ս. Մանուկյան, Ա.Մ. Հարությունյան**. - Ներկայացված է 24.02.2011, հրատարակված է 27.06.2011:
3. **Фомин Н.И., Затуловский Л.М.** Электрические печи и установки индукционного нагрева.- М.: Metallургия, 1979. -247 с.
4. **Фарбман С.А., Колобнев И.Ф.** Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. Изд. доп. и перераб. - М.: Metallургия, 1968. – 496 с.

Պ.Ս. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Ա.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ՑԱԾՐԱՀԱՃԱԽԱԿԱՆ ԽՈՒՂԱԿԱՅԻՆ ՏԵՂԱԿԱՅԱՆՔԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈՂԵԼԸ

Դիտարկված են խուղակային տեղակայանքի էլեկտրական գործընթացների մաթեմատիկական մոդելը և նրա կառուցվածքի մասերը՝ հալքի վաննան, ինդուկտորային տրանսֆորմատորը, էլեկտրասնման սարքը (տիրիստորային լարման կարգավորիչը) և դրանց կապերը: Մոդելն արտացոլում է հետևյալ պարամետրերի ֆունկցիոնալ հարաբերությունները՝ վաննայի երկրաչափական չափերը, բովախառնուրդի քաշը և բնութագրերը, բովախառնուրդի և հալույթի դինամիկ օհմական դիմադրությունը:

Առանցքային բառեր. խուղակային վառարան, բովախառնուրդ, ցանցային տրանսֆորմատոր, դինամիկ օհմական դիմադրություն, լարման տիրիստորային կարգավորիչ:

P. S. MANUKYAN, A.M. HARUTYUNYAN

A MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRICAL PROCESSES OF A LOW-FREQUENCY CHANNEL INSTALLATION

The mathematical models and the constituent parts of the installation - the melting bath, the inductor transformer, the power supply device, as well as their connection are considered. The model reflects the functional connections of the following parameters: the geometric bath dimensions, the weight and characteristics of the batch, the dynamic ohmic resistance of the charge and melt, the electric power, the inductor transformer parameters

Keywords: channel furnace, charge, power transformer, dynamic ohmic resistance, thyristor voltage regulator.