

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПЕЧИ ЭМУ-5,7-60М МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА-ВОЛЬТМЕТРА

Г. Е. Левшин

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Приведены определения магнитной индукции методом амперметра-вольтметра в рабочем объеме электромагнитной печи с горизонтальным магнитным потоком, создаваемым изогнутым магнитопроводом U-образной формы. Метод рекомендован для оценки величины индукции как рабочего параметра индукционных печей при температурах до 1200 – 1400 °С.

Ключевые слова: метод амперметра-вольтметра, магнитная индукция, электромагнитные печи, изогнутый магнитопровод

THE DEFINITION INDUCTION OF ELECTROMAGNETIC FURNARE EMU-5,7-60M BY AMMETR-VOLTMETR

G. E. Levshin

Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Given the definition of magnetic induction by the method of the ammeter-voltmeter in working volume of electromagnetic furnace with a horizontal magnetic flux generated by a curved magnetic core in a U-shape. The method recommended to assess the magnitude of induction as a working parameter of induction furnaces up to temperatures of 1200 – 1400 °C.

Keywords: method ammeter-voltmeter, magnetic induction, electromagnetic oven, curved yoke

Электромагнитные печи с горизонтальным магнитным потоком, создаваемым изогнутым магнитопроводом U-, O- или C-образной формы, предложены в 2013 г. Наличие магнитопровода позволяет увеличить значение рабочей индукции B_e между его полюсами в рабочем объеме печи [1 – 3]. Эти печи имеют ряд преимуществ по сравнению с известными индукционными индукторными печами, создающими вертикальный магнитный поток [4 – 6]. Однако сведения о величине рабочей индукции B_e в доступной литературе не обнаружены. Поэтому измеряли ее в магнитопроводе и рабочем объеме печи ЭМУ-5,7-60М индукционным методом амперметра - вольтметра, имеющим погрешность до 5 – 8 % [7]. Метод достаточно прост и дешев в осуществлении, т. к. не требует дорогих и дефицитных приборов, а измерительная катушка выдерживает повышенные механические воздействия и температуру до 1200 – 1400 °С при изготовлении из нихрома (в отличие от датчика Холла милитесламетра Ш1-15У).

Для этого изготовили стационарную и переносную измерительные катушки ИК1 и ИК2, имеющие количество витков $w=60$ из провода

Ползуновский альманах № 4 2016

ПЭВ медного эмалированного Ø 1,2 мм. Число витков измерительных катушек выбрали равным числу витков силовой электрической катушки (ЭК) печи. Они намотаны на электроизолированные двумя слоями ватмана полюсную часть U-образного магнитопровода и деревянный брусок (рисунок 1). Измерительная площадь сечения катушки ИК1 $S_{ик1}=0,02945 \text{ м}^2$, а ИК2 $S_{ик2}=0,028 \text{ м}^2$. Сочетание ИК1 и ИК2 позволяет определить вертикальную B_v и горизонтальную B_g составляющие вектора индукции. При этом катушка ИК1 позволяет определить только вертикальную B_v внутри полюсной части магнитопровода, а катушка ИК2 – и $B_{ев}$ в воздухе над этой частью магнитопровода при таком же расположении ее витков. Кроме того, катушка ИК2 позволяет определить горизонтальную $B_{ег}$ составляющую вектора индукции в воздухе между вертикальными полюсами U-образного магнитопровода при расположении плоскости витков практически параллельно полюсам.

Сначала катушку ИК2 укладывали посредине между полюсами на текстолитовой площадке (уровень $h=0 \text{ мм}$), закрывающей силовую электрическую катушку печи (рисунок 1, а,

б). Ее центр при этом находился на уровне $h=45$ мм. Затем под катушку ИК2 укладывали поочередно деревянные пластины толщиной 20 и 8 мм. Все измерения индуцированной катушками ИК1 и ИК2 ЭДС проводили тестером ТЛ-4М при частоте тока в сети 50 Гц и напряжении 400 В (или 225 В) по мультиметру мод. DT-838 и токе в силовой катушке печи $I_{\text{эк}}=150$ А (или 81 А), который измеряли амперметром прямого включения мод. Э30 со шкалой 0 – 150 А (класс точности 1,5).

При этом ее низ постепенно подняли на высоту 128 мм (до торца полюса), а центр – на 173 мм (выше торца полюса) (рисунок 1, а). Потом уложили катушку ИК2 на торец левого полюса параллельно стационарной катушке ИК1 (рисунок 1, в).

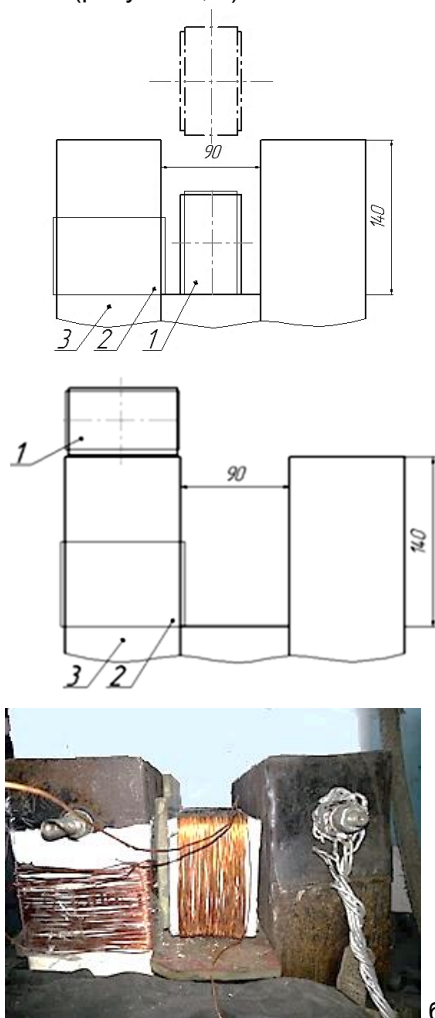


Рисунок 1 – Схемы и фото расположения измерительной катушки ИК2: а, б – между полюсами печи и выше полюсов; в – на левом полюсе; 1 – ИК2, 2 – ИК1, 3 – полюс магнитопровода.

При подъеме катушки ИК2 ЭДС $U_{\text{ик2}}$ сначала практически не изменялась (h до 40 мм), а затем убывала до 30 В. При расположении катушки ИК2 на полюсе $U_{\text{ик2}} \approx 26$ В. Измерения повторили, убирая пластины сверху вниз. Для соблюдения идентичности и достоверности измеряли горизонтальную $B_{\text{ег}}$ составляющую вектора индукции милитесламетром Ш1-15У, располагая плоский датчик Холла посередине межполюсного расстояния на разной высоте. Часть результатов измерений при напряжении 400 В помещены в таблице 1 и на графиках рисунков 2 и 3.

Таблица 1 – Зависимость ЭДС $U_{\text{ик2}}$ и индукции $B_{\text{ег}}$ от высоты h

№ п/п	Высота h расположения ИК2 над уровнем 0, мм		$U_{\text{ик2}}$, В	$B_{\text{ег}}$, Тл		
	низ	центр		ИК2	пересчет	Ш1-15У
1	0	45	65/66	0,194	0,112	0,115
2	8	53	66/66	0,196	0,113	-
3	20	65	66/66	0,196	0,113	0,115
4	28	73	65/66	0,194	0,112	-
5	40	85	65/65	0,193	0,111	0,114
6	48	93	63/63	0,187	0,108	-
7	60	105	60/61	0,180	0,104	0,114
8	68	113	57/58	0,171	0,099	-
9	80	123	54/54	0,160	0,092	0,112
10	88	133	49/50	0,147	0,085	-
11	100	145	45/44	0,132	0,076	0,112
12	108	153	40/40	0,119	0,069	-
13	120	165	35/35	0,104	0,060	0,104
14	128	173	30/30	0,089	0,052	-
15	140	185	25	-	-	0,0876
16	160	205	19	-	-	0,068

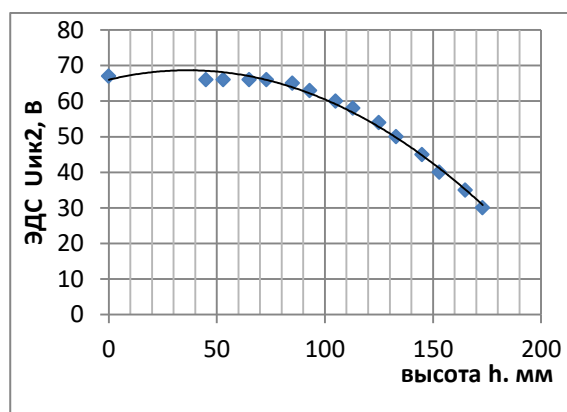


Рисунок 2 – Зависимость ЭДС ИК2 от высоты h подъема центра ИК2 в рабочем объеме

Уравнение аппроксимации графика $U_{\text{ик2}}$ = $-0,002h^2 + 0,1476h + 66$ с достоверностью $R^2 = 0,9906$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПЕЧИ ЭМУ-5,7-60М МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА-ВОЛЬТМЕТРА

Они показывают постепенное уменьшение индуцированной катушкой ИК2 ЭДС при подъеме низа ИК2 на 128 мм, а ее центра на 173 мм с 66 до 30 В (в 2,2 раза). Причем при нахождении катушки ИК2 полностью между полюсами печи это уменьшение незначительно (строки 1 – 5 таблицы), т. к. магнитное поле почти однородно. При дальнейшем ее подъеме поле становится неоднородным и появляется вертикальная $B_{ев}$ составляющая индукции, приводящая к повороту вверх результирующего вектора $B_{ер}$ и уменьшению горизонтальной $B_{ег}$ составляющей.

Сначала посчитали горизонтальную составляющую вектора индукции $B_{ег}$ в рабочем объеме печи по формуле [7].

$$B_{ег} = \frac{U_{ик2}}{K_c \omega \cdot S_{ик} \cdot f} = \frac{U_{ик2}}{4 \cdot 50 \cdot 60 \cdot S_{ик}} = \frac{66}{12000 \cdot 0,028} = \frac{66}{336} = 0,194 \text{ Тл и т. д. } B_{ег} = \frac{30}{336} = 0,089 \text{ Тл.}$$

Здесь $K_c=4$ – коэффициент, характеризующий форму синусоиды ЭДС.

Результаты расчета величины индукции $B_{ег}$ поместили в таблицу 1.

Однако дополнительными измерениями милитесламетром Ш1-15У показано, что ее величина заметно завышена (таблица 1, рисунок 3). Для устранения этого завышения и создания идентичности измерений с милитесламетром Ш1-15У предложена измененная (адаптированная) путем введения эмпирического коэффициента 1,75 формула для расчета индукции $B_{ег}$

$$B_{ег} = U_{ик}/(1,75 \cdot \omega \cdot K_c \cdot S_{ик}).$$

Результаты пересчета величины индукции $B_{ег}$ поместили в таблицу 1. Они показывают удовлетворительную сходимость с показаниями милитесламетра Ш1-15У в рабочем объеме печи и заметное расхождение за его пределами. Это объяснили неоднородностью поля с поворотом результирующего вектора $B_{ер}$ и большой измерительной площадью катушки ИК2.

При расположении катушки ИК2 на горизонтальном торце левого полюса ее ЭДС составила $U_{ик2}=25...26$ В, а вычисленная по адаптированной формуле вертикальная составляющая вектора индукции неоднородного поля в воздухе над этим торцом $B_{ев}=0,042$ Тл. Измерения этой составляющей милитесламетром Ш1-15У непосредственно на торце этого полюса показали закономерно повышенное значение $B_{ев}=0,06$ Тл. При снижении же напряжения на силовой ЭК до 225 В милитесламетр Ш1-15У показал ожидаемое уменьшение $B_{ев}=0,0375$ Тл.

Особо отметим, что ЭДС $U_{ик1}$, характеризующая величину вертикальной $B_{ив}$ составляющей

вектора индукции в магнитопроводе, равна 195 В (при 400 В на силовой ЭК), а рассчитанная по адаптированной формуле вертикальная составляющая $B_{ив}=0,315$ Тл. Для сравнения при снижении напряжения на силовой ЭК до 225 В ЭДС также снизилась до $U_{ик1}=111$ В, а рассчитанная – до $B_{ив}=0,18$ Тл.

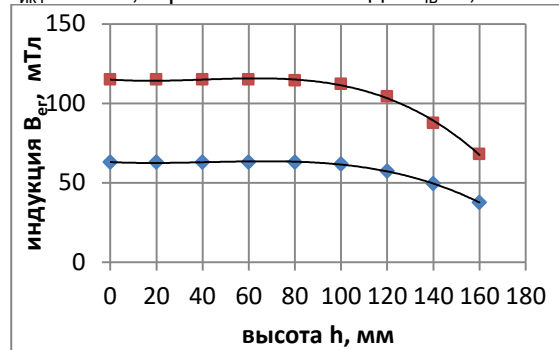


Рисунок 3 – Зависимость горизонтальной составляющей вектора индукции $B_{ег}$ от высоты h подъема плоского датчика Холла милитесламетра Ш1-15У при напряжении сети 225 и 400 В

Уравнения аппроксимации графиков рисунка 3:

$$B_{ег} = -2E-05h^3 + 0,0023h^2 - 0,0663h + 63 \text{ с достоверностью } R^2 = 0,9989 \text{ при } 225 \text{ В,}$$

$$B_{ег} = -3E-05h^3 + 0,0038h^2 - 0,1021h + 115 \text{ с достоверностью } R^2 = 0,9974 \text{ при } 400 \text{ В.}$$

Для установления зависимости вертикальной $B_{ив}$ составляющей вектора индукции в магнитопроводе от напряженности $H_{ээк}$ и индукции $B_{ээк}$ магнитного поля в воздухе центра силовой ЭК высотой $h_{ээк}=0,08$ м печь подсоединили к автотрансформатору РНО-250-10. Медленным поворотом ручки автотрансформатора добивались показаний индуцированной ЭДС $U_{ик1} = 1, 2, 3$ В и т. д. на одном из диапазонов ТЛ-4М. При этом фиксировали показания амперметра Э30 и мультиметра DT-838. При достижении напряжения 250 В печь переключили непосредственно к сети 400 В.

Напряженность $H_{ээк}$ и индукцию $B_{ээк}$ вычислили как:

$$H_{ээк} = I_{ээк} \omega_{ээк} / h_{ээк} = 0,5 \times 60 / 0,08 = 375 \text{ А/м и т. д.}$$

$$B_{ээк} = \mu_0 H_{ээк} = 1,256 \times 10^{-6} \times 375 = 0,000471 \text{ Тл и т. д.}$$

Это позволило установить графическую зависимость $B_{ив}=f(H_{ээк})$ на рисунке 4, аппроксимированную уравнением: $B_{ив} = 3E-06 H_{ээк}$ с достоверностью $R^2 = 0,9925$.

Анализ полученных данных показывает.

1. Измерение ЭДС $U_{ик2}$ методом амперметра-вольтметра с помощью измерительной катушки ИК2 позволяет адекватно оценить величину горизонтальной составляющей вектора индукции $B_{ег}$ между полюсами магнито-

провода путем расчета по предложенной (адаптированной) формуле.

2. Измерение ЭДС $U_{ик1}$ методом амперметра-вольтметра с помощью измерительной катушки ИК1 позволяет адекватно оценить величину вертикальной составляющей вектора индукции B_{iv} в магнитопроводе путем расчета по той же адаптированной формуле.

3. При увеличении электрического напряжения питания $U_{эк}$ до 400 В ток $I_{эк}$ в силовой ЭК возрастает до 150 А, повышая ее магнитодвижущую силу $I_{эк}W$ и напряженность $H_{эк}$ и индукцию $B_{эк}$ магнитного поля, создаваемого ЭК в воздухе, до 9000 А, 111000 А/м и 0,14 Тл, соответственно. Это приводит к практически прямо пропорциональному увеличению индуцированной измерительной катушкой ИК1 ЭДС $U_{ик1}$ до 186 В и, соответственно, индукции B_{iv} в магнитопроводе левого полюса до 0,303 Тл (график $B_{iv}=f(H_{эк})$ на рисунке 4). В теории магнитных цепей и измерений этот график представляет кривую намагничивания тела U-образной формы [7].

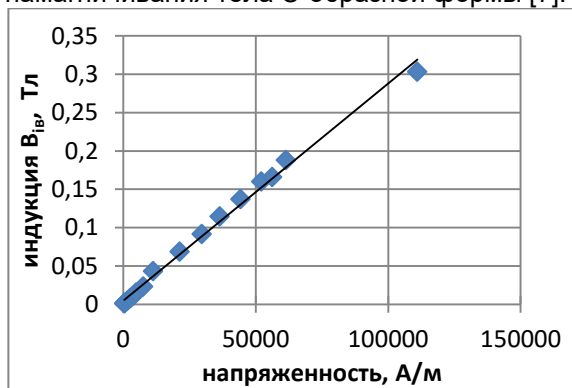


Рисунок 4 – Зависимость вертикальной составляющей вектора индукции B_{iv} в магнитопроводе от напряженности $H_{эк}$ поля в силовой катушке

4. Величина индукции $B_{iv}=0,303$ Тл значительно меньше индукции насыщения трансформаторной стали ($B_{и}=2,1 - 2,2$ Тл). Это свидетельствует о том, что при дальнейшем увеличении электрического напряжения $U_{эк}$ можно ~ в 7 раз повысить ток $I_{эк}$ (до ~1036 А) и, следовательно, напряженность $H_{эк}$ (до ~777000 А/м) и индукцию $B_{эк}$ (до ~0,96 Тл). В результате эквивалентно возрастет эффективность нагрева шихты и расплава.

5. Метод амперметра-вольтметра можно рекомендовать для оценки величины индукции B_{iv} и B_{ef} как более точного рабочего параметра любых индукционных печей (особенно при плавке ферромагнитной шихты) вместо (или наряду) применяемого в настоя-

щее время параметра: мощности, потребляемой печью.

6. Из-за высокой нагревостойкости материала провода измерительной катушки при температурах до 1200 – 1400 °С и выше она может быть расположена в непосредственной близости к рабочему объему и тиглю печи. В электромагнитных печах катушка может охватывать полюсную часть магнитопровода или (будучи выполненной плоской) располагаться на вертикальной поверхности полюса снаружи тигля, в индукторных же печах может охватывать тигель.

*В работе участвовали студенты
Е. С. Баяндин, А. С. Зиновьев*

Список литературы

1. Пат. 2539490 РФ, МПК F27B14/06. Электромагнитная индукционная тигельная плавильная печь с U-образным магнитопроводом и горизонтальным магнитным потоком / Левшин Г. Е., Попов Н. А. Патентообладатель АлтГТУ. – заявл. 12.03.2013; опубл. 20.01.2015.
2. Пат. 2536311 РФ, МПК F27B14/06. Электромагнитная тигельная плавильная печь с C-образным магнитопроводом и горизонтальным магнитным потоком / Левшин Г. Е., Сергеев С. Ю. Патентообладатель АлтГТУ. – заявл. 12.03.2013; опубл. 20.12.2014.
3. Пат. 2539237 РФ, МПК F27B14/06. Электромагнитная тигельная плавильная печь с горизонтальным магнитопроводом и магнитным потоком / Левшин Г. Е., Вагайцев О. П. Патентообладатель АлтГТУ. – заявл. 12.03.2013; опубл. 20.12.2014.
4. Левшин Г. Е. Исследование электромагнитной индукционной печи с U-образным магнитопроводом /Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 263 – 269.
5. Левшин Г. Е. Сравнение индукционных печей с вертикальным и горизонтальным электромагнитным потоком /Металлургия машиностроения». 2015. № 5. С. 2 – 6.
6. Левшин Г. Е. Наукоемкие технологии индукционной плавки в индукторных и электромагнитных тигельных печах /Наукоемкие технологии в машиностроении». 2016. № 3. С. 12-21.
7. Кифер И. И. Испытания ферромагнитных материалов. – М.: Энергия, 1969. – 360 с.

Левшин Геннадий Егорович – д. т. н., профессор

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия