

Краткие сообщения

УДК 621.365.5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИНДУКТОРОВ

Л.С. Зимин, А.С. Егиазарян

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматриваются возможности повышения точности расчета мощных индукторов прямоугольной формы, предназначенных для нагрева слябов из алюминиевых сплавов перед прокаткой. В этом случае в связи с внушительными габаритами установки и сложностью системы электроснабжения и электрооборудования цена ошибки может быть очень дорогой. Поэтому целесообразно, не пренебрегая аналитическими и численными методами расчета, применять физическое моделирование. Показываются возможности моделирования индукционных установок промышленной частоты на частоте 2500 Гц, что позволяет резко уменьшить габариты установки с сохранением особенностей электротехнических, энергетических и тепловых процессов. Также в случае физического моделирования естественным образом учитываются температурные зависимости индуктора и нагреваемого сляба.

Ключевые слова: физическое моделирование, геометрическое подобие, коэффициент приведения.

В настоящее время имеется несколько методик расчета прямоугольных индукторов [1–3], использующих в основном представление системы «индуктор – заготовка» в виде воздушного трансформатора. Если для холостого индуктора расчет по указанным методикам дает довольно точные результаты, то расчет загруженного индуктора может привести к весьма значительным ошибкам. Причин здесь в основном две: первая, расчетного характера, заключается в том, что не найдено надежных формул для определения коэффициента взаимоиндукции индуктора и загрузки при различных размерах и взаимоположениях. Этот коэффициент определяет коэффициент приведения параметров вторичного контура к первичному, без чего невозможно рассчитать полное сопротивление системы «индуктор – заготовка».

Вторая причина заключается в трудности выбора расчетного удельного электросопротивления загрузки, например, алюминиевых сплавов [4], т. к. характер зависимости их от температуры известен не для всех сплавов. В результате проведенных экспериментов установлено, что величина ρ в процессе нагрева до 450–500 °С изменяется примерно в два раза, но как это отражается на полном сопротивлении системы, можно определить, лишь зная коэффициент приведения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-08-03053).

Лев Сергеевич Зимин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Александра Сергеевна Егиазарян (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Приведенные доводы позволяют заключить, что аналитический расчет может быть использован лишь в качестве прикидочного. Для точного расчета мощных индукционных нагревательных установок (ИНУ), предназначенных, например, для нагрева слябов весом до 3–4 т, когда затраты на изготовление весьма велики, необходим более надежный метод расчета. В качестве такого может быть использован метод физического моделирования на основе геометрического подобия, когда

$$(\ell_m/\ell_o)^2 = f_o/f_m, \quad (1)$$

где ℓ_m , ℓ_o , f_m , f_o – соответственно размеры и частота тока модельного и оригинального индукторов.

При моделировании мощных индукторов промышленной частоты использовалась частота 2500 Гц, что позволило проводить эксперименты на модели, имеющей размеры в 7,07 раз меньше, чем оригинальный индуктор.

Результаты экспериментов на индукторе натуральных размеров (табл. 1) показывают вполне достаточную точность моделирования. Сравнение производилось при включении половины длины индуктора по однофазной схеме, т. к. трехфазную нагрузку смоделировать невозможно. При этом, естественно, коэффициент пересчета параметров, приведенных к одному витку, был не 7,07, а 3,53 с некоторыми отклонениями. Так, например, при пересчете полных сопротивлений из-за несоответствия соотношений между длиной и размерами поперечного сечения модели и натуре он будет несколько выше (3,7), а для активного сопротивления витков индуктора – несколько ниже (3,2).

Определяющим параметром при моделировании является коэффициент активной мощности:

$$K = P_{и} (w/U)^2, \quad (2)$$

где $P_{и}$, U , w – полная активная мощность, напряжение и число витков индуктора.

Пересчитав этот коэффициент к натуре, можно, зная необходимую мощность ИНУ ($P_{н}$), рассчитать основной проектный параметр – напряжение на виток:

$$(U_{н}/w_{н})^2 = P_{н}/K. \quad (3)$$

Физическое моделирование дает возможность наиболее точно определить основной параметр проектирования – коэффициент приведения, который определяется по выражению

$$\alpha = (I_з/I_{и} w_{и})^2, \quad (4)$$

где $I_з$, $I_{и}$ – токи в заготовке и индукторе.

Измерить ток в заготовке на модели возможно с помощью пояса Роговского, который продевается в отверстие, просверленное по центру заготовки (слитка). Слиток в данном эксперименте состоял из целой части длиной 275 мм и 10 пластин толщиной по 10 мм каждая.

Минимальная величина α , равная 0,58, была получена при длине слитка 275 мм; при увеличении длины с помощью пластин α возрастает.

Кроме исследования электрических параметров физическая модель может использоваться для моделирования температурных полей. В этом случае необходимо обеспечить постоянство критерия Фурье (Fo). Основной трудностью при моделировании температурных полей является обеспечение подобия тепловых потерь, а также регистрация температуры во времени. При моделировании на частоте 2500 Гц мощных ИНУ, работающих на промышленной частоте, время нагрева для соблюдения подобия должно быть в 50 раз меньше натурального, кото-

рое для промышленных слябов составляет 40–50 мин. Поэтому время моделирования должно составлять порядка одной минуты.

С помощью физического моделирования экспериментально был определен к.п.д. ИНУ, который можно представить как

$$\eta = P_3/P_{и}, \quad (5)$$

где P_3 , $P_{и}$ – соответственно поперечные периметры заготовки и индуктора, причем у индуктора – внутренний, а у заготовки – внешний.

Последнее выражение было проверено при опытно-промышленной эксплуатации натуральных ИНУ (см. табл. 1). Из приведенных данных видно, что производительность нагрева и к.п.д. в основном определяются заполнением индуктора загрузкой (слябом).

Например, как видно из п.п. 6 и 10 табл. 1, практически при одинаковом полном весе загрузки производительность, а соответственно, и к.п.д. в п. 10 значительно выше, т. к. в этом случае гораздо больше общее поперечное сечение загруженных слябов.

Опытно-промышленный нагрев слябов проводился в индукторах, параметры которых показаны в табл. 2.

При измерении мощности многофазных индукторов получается неравномерное распределение ее по секциям. Однако это чисто электрический эффект, т. к. интенсивность нагрева частей сляба, находящихся в разных секциях, одинакова.

Таблица 1

**Влияние заполнения индуктора на производительность
(индуктор 0,42×1,9×1,15 м³)**

| № | Алюминиевый сляб, мм | Вес | т/час | № | Алюминиевый сляб, мм | Вес | т/час |
|---|----------------------|-----|-------|----|---------------------------|------|-------|
| 1 | 280×1070×815 | 598 | 0,25 | 6 | 280×1400×1070 | 1064 | 0,57 |
| 2 | 280×900×1070 | 660 | 0,323 | 7 | (225×830×950)×2 | 866 | 0,585 |
| 3 | 280×1070×1150 | 844 | 0,38 | 8 | (225×830×1070)×2 | 1000 | 0,635 |
| 4 | 280×1070×1100 | 807 | 0,405 | 9 | (280×710×1070)×2 | 1042 | 0,69 |
| 5 | (225×830×650)×2 | 592 | 0,48 | 10 | 280×730×1070+280×900×1070 | 1200 | 0,805 |

Таблица 2

Параметры системы «индуктор – металл»

| № | Сплав | Сляб, мм | z, Ом | z ₁ , Ом | г, Ом | г ₁ , Ом |
|---|-------|---------------|--------|---------------------|---------------|---------------------|
| 1 | А1 | 280×1240×1100 | 0,224 | 0,345 | 0,0243 | 0,0175 |
| 2 | А1 | 280×1540×1100 | 0,197 | 0,345 | 0,0279 | 0,0175 |
| 3 | А1 | 280×1700×1100 | 0,187 | 0,345 | 0,0283 | 0,0175 |
| 4 | АМг6 | 280×1240×1300 | 0,161 | 0,218 | 0,025–0,029 | 0,0126 |
| 5 | АВ | 280×1540×1300 | 0,136 | 0,218 | 0,0266–0,0324 | 0,0126 |
| 6 | А1 | 280×1240×1000 | 0,0266 | 0,043 | | |
| 7 | А1 | 280×1240×400 | 0,028 | 0,043 | | |

В табл. 2 даны полные и активные сопротивления пустого (z_1 , $г_1$) и загруженного индуктора (z , $г$). Экспериментальные значения этих сопротивлений хорошо сходятся с расчетными, где коэффициент приведения получен методом физического моделирования. Параметры индукторов на промышленной частоте имеют хорошую сходимость со своими моделями.

Результаты приведенных исследований показывают, что физическое моделирование повышает эффективность проектирования систем индукционного нагрева металла под деформацию [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Егiazарян А.С.* Возможные подходы к проектированию индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – №1 (45). – С. 194–198.
2. *Егiazарян А.С., Зимин Л.С.* Аналитические исследования при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 1 (23). – С. 152–159.
3. *Зимин Л.С., Бузановский Я.И., Федотов М.Е.* К аналитическому расчету индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2005. – № 37. – С. 44–47.
4. *Зимин Л.С., Бузановский Я.И., Федотов М.Е.* Особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2004. – № 24. – С. 159–163.
5. *Егiazарян А.С., Зимин Л.С.* Повышение эффективности индукционного нагрева металла под деформацию // Индукционный нагрев: научно-технический журнал. – № 22. – СПб.: КОМЛИЗ-ПОЛИГРАФИЯ, 2012. – С. 41–43.

Статья поступила в редакцию 8 июня 2016 г.

RECTANGULAR INDUCTORS DESIGN

L.S. Zimin, A.S. Yeghiazaryan

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The possibility of improving the accuracy of the calculation of a powerful inductor of rectangular shape, for heating slabs of aluminum alloys before rolling is considered taking into account the installation size and electricity system complexity and equipment. The failure cost may be very high. Therefore, without neglecting the analytical and numerical calculation methods, it is advisable to use the physical modeling. The simulation possibility of induction units of industrial frequency on physical models with a frequency of 2500 Hz is shown. This allows to reduce considerably the dimensions of the unit, without changes the characteristics of energy and thermal processes. Also in the case of physical simulation the temperature dependences parameters of the inductor and the heated slab are naturally taken into the consideration.

Keywords: *physical modeling, geometric similarity, the coefficient of adjustment.*

*Lev S. Zimin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor .
Alexandra S. Yeghiazaryan (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*