

## Краткие сообщения

УДК 621.365.5

### ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ<sup>1</sup>

*А.С. Егиазарян, Л.С. Зимин*

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

*Рассматриваются особенности индукционного нагрева тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, к которым в первую очередь относятся прямоугольные заготовки большого поперечного сечения, например слябы при нагреве под прокатку. В этом случае необходимо учитывать объемную плотность электромагнитного поля, которая проявляется в виде электродинамического взаимодействия индуктора прямоугольного сечения и сляба. В результате возникают сильные вибрации и шум, превышающий санитарные нормы. Проведенные исследования позволяют сделать рекомендации по учету электродинамических и виброакустических процессов при проектировании индукторов прямоугольной формы. Электродинамические расчеты проводились на численной математической модели, построенной с использованием метода связанных контуров и принципа возможных перемещений.*

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, электродинамические силы, вибрации, акустическое излучение.

Индукционный нагрев тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, к которым в первую очередь относятся слябы, характеризуется рядом проблем, которые в случае цилиндрических заготовок или вообще не возникают, или довольно легко разрешаются. Это прежде всего двумерный характер электромагнитного и температурного полей в поперечном сечении, когда температурный перепад между поверхностью и центром уже нельзя рассматривать в зависимости только от одной координаты [1].

Вторая проблема определяется тем, что электромагнитные процессы в системе «индуктор – металл» характеризуются не только выделением тепловой энергии в заготовке и индукторе, но также объемной плотностью электромагнитного поля и связанными с ней электродинамическими усилиями [2]. Если в плавильных печах электродинамические силы могут улучшить перемешивание жидкого металла, то при индукционном нагреве под деформацию механическое проявление электромагнитной энергии играет резко отрицательную роль, так как возникает проблема устойчивости конструкций индукторов против вибраций под действием электродинамических сил. Особенно остро эта проблема проявляется

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-08-03053).

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

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

при индукционном нагреве прямоугольных заготовок. Это явление может быть использовано на производстве для получения искусственных вибраций для различных целей, например для трамбовки формовочных смесей [3].

В индукторах для нагрева цилиндрических заготовок отсутствуют условия для возникновения значительных вибраций (круглое поперечное сечение обладает большой естественной жесткостью), а в индукторах прямоугольной формы необходимо принимать во внимание малую устойчивость прямолинейных участков обмотки индуктора. Причем суть проблемы представляет не механическая прочность медной трубки индуктора, поскольку возникающие напряжения изгиба гораздо меньше допустимых для меди, а сильная вибрация и сопровождающий ее шум, которые, если не принимать специальных мер, значительно превышают санитарные нормы для производственных помещений.

Электродинамическое взаимодействие в индукционной системе «индуктор – металл» определяется из уравнений Максвелла и вектора Пойтинга, хотя электромагнитные силы можно определить также из энергетических соображений, не обращаясь к представлениям поля, а ограничиваясь выражением энергии через интегральные параметры и применяя закон сохранения энергии к рассматриваемой системе. Оба этих способа ведут к совершенно одинаковым конечным формулам, но при использовании теории поля получается лучшая взаимосвязь с электромагнитными и тепловыми процессами в системе «индуктор – металл».

Тогда центробежное давление, равномерно распределенное по всей внутренней поверхности индуктора, с учетом амплитуды напряженности магнитного поля ( $H_0$ ) будет равно

$$G_{(r)} = 0,25\mu_0 H_0^2 (1 + \cos 2\omega t). \quad (1)$$

Можно показать, что это давление обратно пропорционально так называемому коэффициенту поглощения мощности  $\sqrt{\rho\mu f}$  (где  $\rho$ ,  $\mu$  – соответственно удельное электросопротивление и магнитная проницаемость нагреваемого металла). Таким образом, при одинаковой удельной мощности наибольшее давление будет испытывать обмотка индуктора, предназначенного для нагрева немагнитных металлов с малым удельным электросопротивлением, к которым относятся алюминиевые слябы, на промышленной частоте тока как самой низкой из применяемых в настоящее время для индукционного нагрева.

Электродинамические расчеты целесообразно проводить на численной математической модели, построенной с использованием метода связанных контуров и принципа возможных перемещений [4]. При этом электродинамическое взаимодействие в системе «индуктор – металл» сводится к взаимодействию совокупности индуктивно связанных контуров, по одним из которых протекают токи индуктора, а по другим – вихревые токи. Электродинамические силы в такой расчетной системе можно определить через энергию электромагнитного поля  $W_M$  контуров P и R:

$$\vec{F} = \text{grad} W_M; \quad W_M = I_P I_R M_{P,R} / 2. \quad (2)$$

Формула (2) подразумевает двойное суммирование – по P и по R, причем если  $P \neq R$ , то  $M_{P,R}$  – взаимдуктивность контуров, а в противном случае  $M_{P,R}$ ,  $M_{P,R}$  – их собственные индуктивности.

Расчет акустического излучения любого объемного тела следует рассматривать как связанную упругоакустическую задачу. Однако ее решение в строгой математической постановке возможно только для ограниченного круга идеали-

зированных колебательных систем. Поэтому с допустимой степенью упрощения поставленная задача разбивается на две: вначале рассчитываются колебания системы под действием известной электродинамической нагрузки без учета влияния среды, а затем определяется акустическое излучение при заданных колебаниях.

Для численного решения вибрационной задачи целесообразно использовать метод конечных элементов (МКЭ) [5, 6]. С учетом формы границ индуктора применены прямоугольные КЭ. Переход от системы с бесконечным числом параметров напряженно-деформированного состояния к системе с конечным числом степеней свободы осуществляется в результате ансамблирования КЭ, при этом математическая модель задачи представляется системой дифференциальных уравнений

$$[M][\ddot{W}]_r + [C][\dot{W}]_r + ([K] + [F])_r [W]_r = [G], \quad (3)$$

где  $[K], [M], [C]$  – матрицы жесткости, массы и демпфирования ансамбля КЭ;

$[G]_r, [F]_r$  – векторы центробежной и осевой нагрузок;

$[W]_r$  – вектор узловых перемещений.

Для интегрирования системы (3) был выбран  $\Theta$ -метод Вилсона. В итоге на каждом временном шаге с помощью процедуры  $LDL^T$ -факторизации решается система линейных алгебраических уравнений относительно КЭ параметров вибраций в узлах расчетной сетки КЭ.

Преодоление звукового излучения мощных ИНУ являются довольно сложной задачей, которая характеризуется как особенностями самой ИНУ, так и помещением, где она расположена. В самом общем случае для определения распределенных усилий по всему индуктору был использован закон Био – Савара – Лапласа, который позволяет найти вектор магнитной индукции в электрических системах любой сложности и тем самым определить настил тока в слябе. Затем, разбив заготовку на конечное число прямоугольных контуров, определяют значения токов в этих контурах. Определив ток в обмотке индуктора с учетом взаимдуктивности, рассчитанной по известной формуле двух коаксиальных прямоугольников по методу ряда Тейлора, находят электродинамические усилия как на обмотку индуктора, так и на поверхность заготовки.

При исследовании вибродинамической модели индуктора была синтезирована форма оптимальной оболочки индуктора, состоящей из стеклопластика и бетонных блоков, по критерию минимального шумоизлучения (максимальной жесткости) [7, 8].

Такой индуктор мощностью 1500 кВт, выполненный медной трубкой 26×32 мм со смещенным отверстием диаметром 18 мм (для охлаждения), при нагреве алюминиевого сляба размерами 0,3×1,24×2,4 м на промышленной частоте создает шум не более 65 дБ, а без бетонных блоков шум достигал 125 дБ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Егузарян А.С., Зимин Л.С.* Поперечный краевой эффект при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 7 (28). – С. 231-233.
2. *Зимин Л.С.* Вибростойкость прямоугольных систем индукционного нагрева. Теория и практика индукционного нагрева. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 64-70.
3. *Зимин Л.С., Тихонов И.Н., Лукин К.А.* Виброплощадка. А.с. 347100 СССР/№1630865, заяв. 22.03.71, опуб. 10.08.72. Б.И. № 24.

4. Зимин Л.С., Сутягин А.Ф. Расчет вибрационных и акустических характеристик индукторов прямоугольной формы // Известия вузов. Электромеханика. – 1986. – № 10. – С. 103-109.
5. Зимин Л.С., Каримов Д.А. Моделирование электродинамических усилий в системах индукционного нагрева немагнитных тел прямоугольной формы // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2004. – № 20. – С. 121-126.
6. Зимин Л.С., Каримов Д.А. Оптимизация индукционных систем по электродинамическим параметрам // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2002. – № 14. – С. 185-190.
7. Зимин Л.С., Гецелев З.Н., Астанин С.Д., Рапопорт Э.Я., Сабуров В.В. Индукционная печь. А.с. 154555 СССР № 773323, заяв. 10.04.62, опубл. 14.03.63. Б.И. № 10.
8. Зимин Л.С., Сутягин А.Ф., Хасаева Л.И., Ящков С.А. Устройство для индукционного нагрева слябов. А.с. 1669085 СССР № 4425222, опубл. 07.08.91. Б.И. № 29.

*Статья поступила в редакцию 28 января 2016 г.*

## ELECTRODYNAMIC PROCESSES IN INDUCTION HEATING

***A.S. Yeghiazaryan, L.S. Zimin***

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

*The paper discusses the features of induction heating of bodies with sharply changing curvature of the surface, one should take into account the volume density of the electromagnetic field which manifests itself in the form of an electrodynamic interaction between the inductor and the slab. It results in strong vibration and noise exceeding health standards. These investigations enable making recommendations which take into account electrodynamic and vibroacoustic processes when designing rectangular inductors. The electrodynamic calculations were done using a numerical mathematical model constructed by means of the method of coupled circuits and the principle of possible displacements.*

**Keywords:** *electromagnetic field, electromagnetic force, vibration, acoustic radiation.*

---

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