

УДК 621.365.511

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХФАЗНОГО ИНДУКТОРА ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ С МАГНИТОПРОВОДОМ СТАТОРНОГО ТИПА

*Н.Н. Клочкова, А.В. Обухова, А.Н. Проценко*

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

*Рассмотрены вопросы, связанные с проектированием трехфазного индуктора поперечного поля с магнитопроводом статорного типа, а именно вопросы оптимизации толщины проводника индуктора и числа пазов магнитопровода. Поставленная задача решается на примере нагрева цилиндрической заготовки из алюминиевого сплава. Для решения задачи был использован программный пакет Elcut. В качестве критериев оптимальности приняты полный КПД индуктора и общие энергозатраты на нагрев при условии достижения необходимой температуры. В результате исследования наилучшие результаты показал магнитопровод с шестью пазами толщиной проводника 15 мм, КПД составил 0,422.*

**Ключевые слова:** *индукционный нагрев, магнитопровод, оптимизация, конструкция, энергозатраты.*

Во многих отраслях промышленности в настоящее время для нагрева различных заготовок находят применение индукционные системы. К их достоинствам относятся надежность, безопасность, компактность, экологичность, а также возможность автоматического управления процессом нагрева. Однако разнообразие форм и размеров нагреваемых изделий диктует применение различных конструкций индукционных нагревателей с учетом требований, предъявляемых к нагревателю технологическим процессом, условиями работы, изменением рабочих температур, эффективностью, производительностью и т. п.

Применяемые в настоящее время индукционные нагревательные установки для сквозного нагрева заготовок больших размеров под ковку и штамповку чаще всего представляют собой многосекционную систему индукторов и питаются трехфазным переменным током промышленной частоты (рис. 1).

Главной проблемой в таких установках является неравномерность распределения мощности по длине загрузки (рис. 2) и по фазам. Неравномерность распределения мощности, потребляемой от сети секциями индуктора, подключенными к различным фазам, связана не только с различием их сопротивлений из-за разных температур и свойств соответствующих частей загрузки, но и, главным образом, со взаимным влиянием секций [2].

При питании соседних секций токами разных фаз наблюдается их взаимное влияние, называемое переносом мощности, даже при одинаковых сопротивлениях секций. При этом активная и реактивная мощности секций различны. Нерав-

---

*Наталья Николаевна Клочкова (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Алла Васильевна Обухова (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Александр Николаевич Проценко (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

номерность реактивной мощности можно скомпенсировать конденсаторными установками. Различие активной мощности вызывает неравномерность загрузки фаз, дополнительные потери в сети и перекося напряжений. Все это приводит к неравномерному нагреву заготовки (рис. 3).

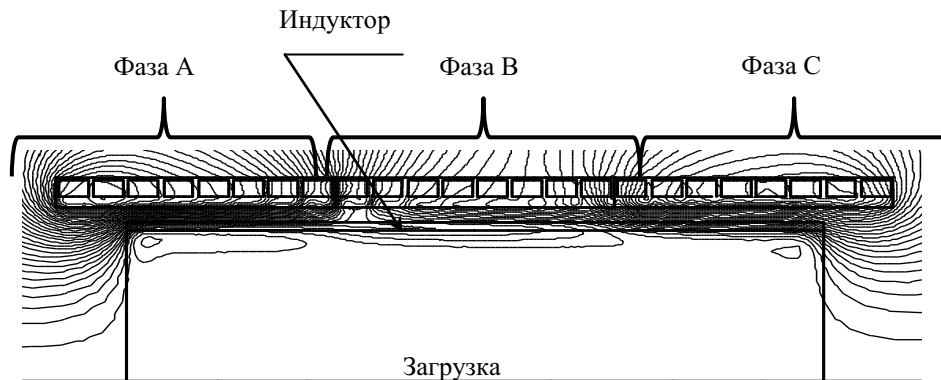


Рис. 1. Трехфазный индуктор для нагрева заготовок в продольном магнитном поле

Для получения требуемого качества нагрева используют два способа: пространственное управление нагревом, например сгущение витков, введение дополнительного второго слоя в зоне стыка, или установка магнитопровода для магнитной связи между секциями.

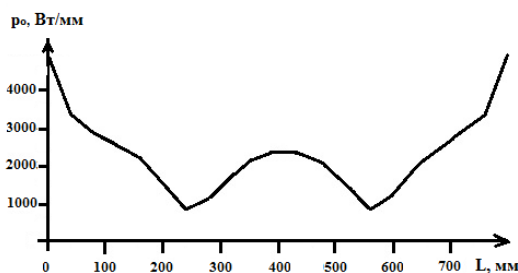


Рис. 2. Распределение мощности по длине заготовки при нагреве в продольном магнитном поле трехсекционного индуктора без магнитопровода

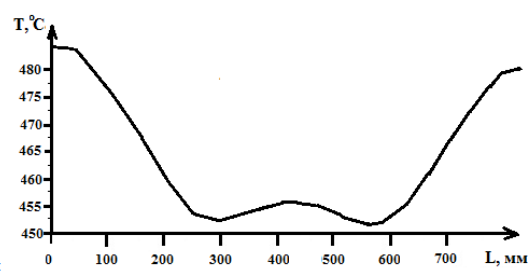


Рис. 3. Распределение температуры по поверхности заготовки

При использовании магнитопровода, изготовленного из листов электротехнической стали, мощность в зоне стыка секций (см. рис. 2) резко повышается. Поверхностная плотность тока в заготовке по ширине паза магнитопровода изменяется сравнительно мало и быстро падает за его пределами, это проявляется в четко определенной границе зоны высокой температуры. Возможность влияния на распределение индуктируемого тока в ряде случаев оказывается полезной для выравнивания температуры при индукционном нагреве деталей формы. Применение магнитопроводов к тому же заметно повышает коэффициент полезного действия индукторов [3]. Однако магнитопровод никак не влияет на неравномерность загрузки фаз сети, питающей многосекционные индукторы продольного поля.

Индукционная установка, представляющая собой трехфазный индуктор в замкнутом цилиндрическом магнитопроводе [1], естественным образом равномерно нагружает трехфазную сеть. В качестве такой конструкции индукционного нагревателя рассматривается индуктор с замкнутым цилиндрическим магнитопроводом в форме статора трехфазного асинхронного двигателя. В продольных пазах магнитопровода такого индуктора размещаются три однофазные катушки 2, 3, 4 (рис. 4).

Разработка подобной конструкции индуктора требует решения новых задач: разработки математических моделей процессов индукционного нагрева; проектирования конструкции индукционной нагревательной системы с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами; разработки алгоритмов оптимального управления режимами работы технологического комплекса. Первоочередной является задача разработки конструкции индукционной системы, в частности определения рационального числа и ширины пазов, чередования фаз, толщины трубки индуцирующего провода, расчета охлаждения индуктора и т. п.

В данной статье рассмотрена лишь малая доля вопросов, связанных с проектированием индукционной установки предлагаемой конструкции, а именно вопросы оптимизации толщины проводника индуктора и числа пазов магнитопровода.

Сформулированная задача решается на примере нагрева цилиндрической заготовки из алюминиевого сплава Д16 диаметром 420 мм длиной 800 мм до температуры 480 °С с допустимым перепадом 25 °С (рис. 5) перед горячей штамповкой. Для сквозного нагрева заготовок оптимальная частота  $f$  выбирается из условия [3]

$$3000/D_2^2 < f < 6000/D_2^2, \text{ где } D_2 - \text{ диаметр заготовки, см.}$$

В данном случае частота находится в пределах 17÷34 Гц, ближайшая стандартная частота 50 Гц, которая наиболее часто применяется для индукционного нагрева крупногабаритных заготовок. Индуктор выполнен медным проводником 40 × 40 мм с трубкой для отвода тепла.

При данных конструктивных параметрах индуктора (система «индуктор – металл») магнитное поле вдоль длины индуктора можно считать плоскопараллельным.

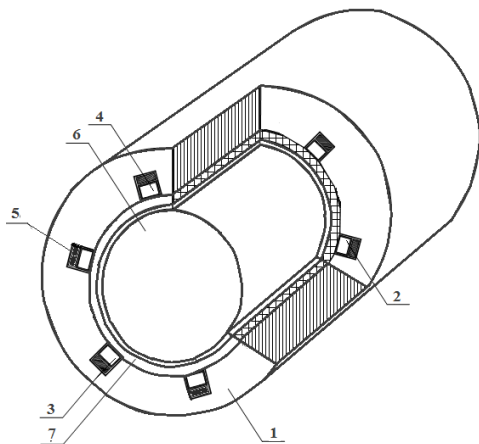


Рис. 4. Эскиз конструкции индуктора:  
1 – магнитопровод; 2, 3, 4 – проводники катушки;  
5 – трубка водяного охлаждения; 6 – заготовка;  
7 – фуговка

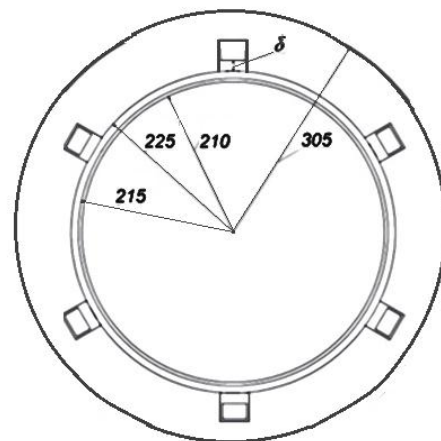


Рис. 5. Модель «Индуктор – загрузка»:  
 $\delta$  – толщина проводника катушки

Для решения поставленной задачи был использован программный пакет Elcut, позволяющий решать взаимосвязанные задачи расчета электромагнитных и тепловых полей для двухмерных моделей методом конечных элементов (МКЭ). Основные этапы решения поставленной задачи МКЭ следующие: построение геометрической модели системы, присвоение имен и задание свойств блокам модели; задание граничных условий; разбиение модели на сетку конечных элементов; решение задачи магнитного поля вихревых токов; решение задачи нестационарной теплопередачи.

На рис. 6 приведена геометрическая модель, разбитая на сетку конечных элементов. Исходные данные по блокам приведены в табл. 1.

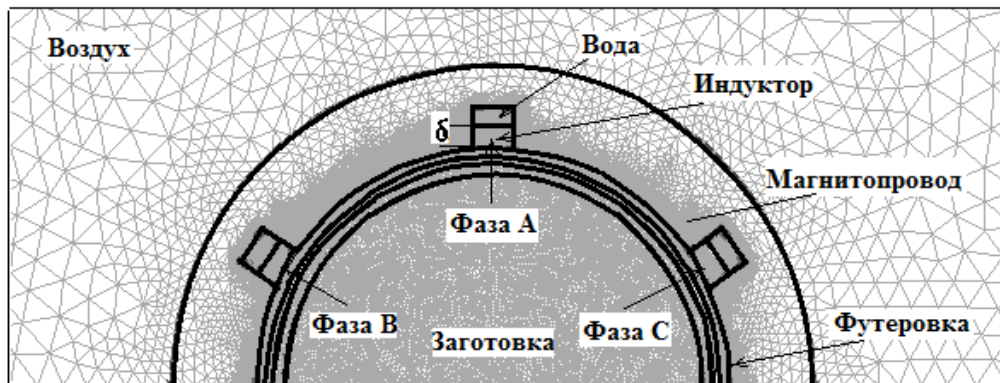


Рис. 6. Геометрическая модель с сеткой конечных элементов

При прохождении по проводнику тока в нем выделяется тепло, это особенно важно для токопроводов индукторов из-за использования в индукционных установках больших мощностей, порядка 20–100 кВт, и высокой плотности тока – 15–20 А/мм<sup>2</sup>. Под токопроводом понимается сплошной медный проводник, к которому с противоположной стороны от заготовки приварена водоохлаждающая трубка. Толщина проводника зависит от глубины проникновения тока.

Таблица 1

Данные для геометрической модели системы «Индуктор – металл»

Блок	Магнитная проницаемость, ОКН	Электропроводность, См/м	Ток, кА	φ	Теплопроводность, Вт/(К•м)	Теплоемкость, Дж/(кг•К)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Воздух	1	0	–	–	0,0298	1005	1,1
Вода	1	0,01	–	–	0,64	4182	998
Заготовка	1	25650000	–	–	130	922	2800
Магнитопровод	5685	5	–	–	20	465	7833
Фаза А	1	58100000	15	0	384	385	8890
Фаза В	1	58100000	15	120	384	385	8890
Фаза С	1	58100000	15	240	384	385	8890
Футеровка	1	0	–	–	0,2	800	2700

Первая часть исследований проводилась для определения оптимальной толщины проводника токопровода (δ) со стороны заготовки. Критерием оптимальности служил максимально возможный коэффициент полезного действия (η) при

сохранении постоянной плотности тока. Толщина проводника  $\delta$  изменялась в пределах от 3 до 20 мм, наилучший результат  $\eta = 0,422$  наблюдается при  $\delta = 15$  мм (рис. 7).

Число пазов в магнитопроводе может быть различным, но должно быть кратным количеству фаз питающей сети. Количество пазов влияет как на коэффициент полезного действия (КПД) индуктора, так и на равномерность нагрева, поэтому для определения рационального количества пазов необходимы исследования. В качестве критериев оптимальности в данном случае приняты КПД индуктора и энергозатраты на нагрев при условии достижения необходимой температуры. Ширина паза  $a_{\text{паз}}$  во всех вариантах принималась одинаковой – 40 мм. В результате исследования магнитопровод с шестью пазами показал наилучшие результаты (табл. 2), распределение температур показано на рис. 8.

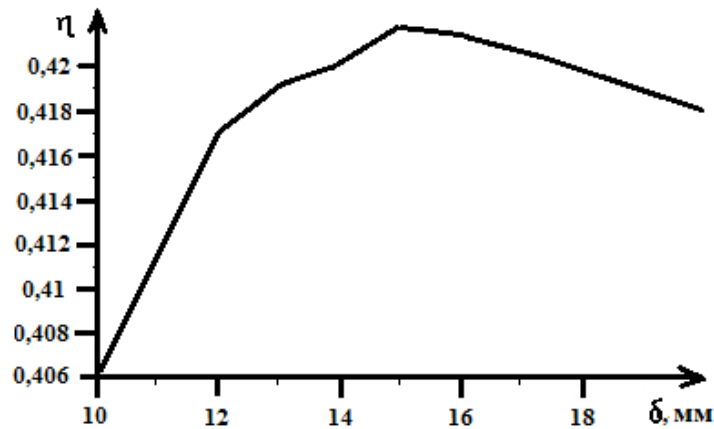
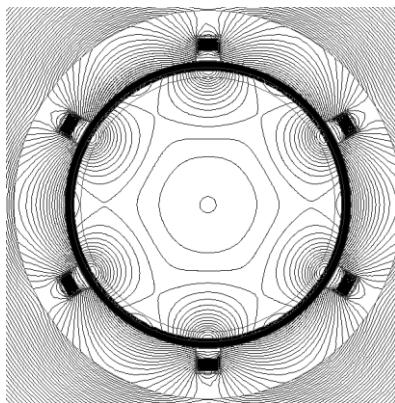
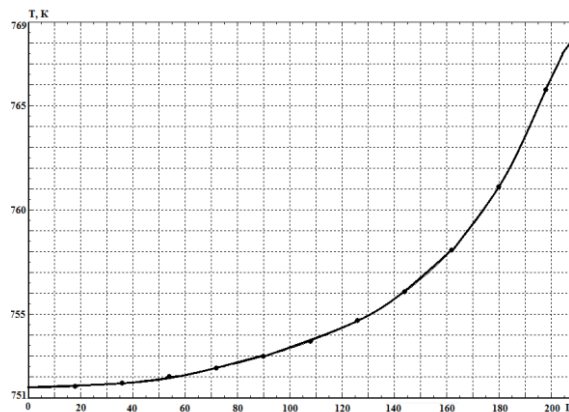


Рис. 7. График зависимости  $\eta$  от толщины проводника индуктора



*a*



*б*

Рис. 8. Распределение температур:

*a* – изотермы с шагом 1 К или градус, центр самый холодный, соответствует минимуму 479 град;  
*б* – график распределения температур по радиусу

Результаты исследования магнитопровода

Число пазов	P, кВт	T <sub>min</sub> , °C	T <sub>max</sub> , °C	ΔT, °C	t, сек	W, кВт·час	η
6	54,592	476	492	16	9750	147,85	0,42
12	54,506	479	487	8	10250	155,190	0,412
18	55,647	481	487	6	11250	173,9	0,38

Как видно из табл. 2, более равномерный нагрев наблюдается при увеличении количества пазов, что соответствует увеличению площади нагреваемой поверхности изделия. Однако при увеличении числа пазов КПД установки падает. Следовательно, можно предположить, что увеличение ширины паза при оптимальном количестве пазов приведет к улучшению показателей нагрева.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Никитина Е. А.* Исследование и разработка трехфазного индуктора для нагрева цилиндрических заготовок в поперечном магнитном поле: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 2011.
2. *Немков В.С., Демидович В.Б.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1988. – 280 с.
3. *Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е.* Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

*Статья поступила в редакцию 15 января 2015 г.*

## DESIGN OF TRANSVERSE FIELD THREE PHASE INDUCTOR WITH A MAGNETIC CORE AS STATOR

***N.N. Klochkova, A.V. Obuchova, A.N. Protsenko***

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

*The paper deals with the issues of designing the cross field three-phase inductor with stator-type magnetic core, namely the optimization of the inductor conductor thickness and the number of the magnetic core slots. This problem is solved by the example of the heating of the cylindrical aluminum workpiece. 'Elcut' software package was used to solve the problem. The overall inductor efficiency and overall energy consumption for heating to achieve the required temperature were adopted as the optimality criteria. Magnetic core with six slots and conductor thickness of 15 mm proved to be the best according to the results of study. Efficiency is 0.422.*

**Keywords:** *induction heating, magnetic, optimization, construction, energy consumption.*

---

*Natalia N. Klochkova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

*Alla V. Obuchova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

*Alexander N. Protsenko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*