

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА МЕДНЫЙ ПРОВОДНИК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА COMSOL MULTIPHYSICS

*Р.Г. Калинин, аспирант каф. ПрЭ,*

*В.А. Федотов, зав. лабораторией ГПО*

*Научный руководитель: В.Д. Семенов, канд. техн. наук,*

*профессор, зам. зав. каф. ПрЭ по НР*

*Томск, ТУСУР, [rokali@mail.ru](mailto:rokali@mail.ru)*

По показателям глубины нагрева, КПД, габаритам и т.д. индукционный нагрев является одним из наиболее результативных способов нагрева проволоки[1].

При сравнении видов индукторов самым лучшим вариантом, с точки зрения эффективности, служит соленоид. Благодаря конструктивным особенностям соленоид позволяет концентрировать однородный магнитный поток в центре[2]. Но конструкция соленоида является и его слабым местом при нагреве тонких проводов. Согласно [3] нужно выдерживать необходимое расстояние между нагреваемым объектом и внутренним контуром индуктора. В связи с чем, изготовить индуктор для нагрева проводов малых диаметров, на сегодняшний день, не представляется возможным. В таком случае необходимо применять индуктор с концентратором из материала с высокой магнитной проницаемостью. В отличие от предыдущей конструкции, в зазоре концентратора создается поперечное, по отношению к нагреваемому объекту, магнитное поле.

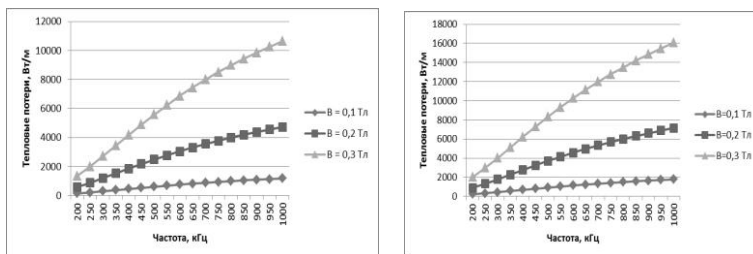
Для разработки и конструирования оптимального концентратора необходимо провести исследования влияния поперечного магнитного поля на нагрев проволоки, влияние геометрии магнитопровода и оценить влияние расположения обмоток на процесс нагрева.

В данной статье проведено исследование влияния продольного и поперечного магнитного поля на нагрев проволоки при изменении частоты и индукции магнитного поля.

Математическая модель построена в программном пакете COMSOL Multiphysics с использованием AC/DC модуля. По результатам полученным в эксперименте построены графики зависимостей тепловых потерь от частоты и индукции поля (рис. 1).

Суть эксперимента «среда-проводник» заключается в следующем: создается однородное магнитное поле с продольным или поперечным направлением потока, по отношению к располагаемому объекту, с

параметрами индукции ( $B$ ) и частоты ( $f$ ). В «среду» помещается цилиндрический объект диаметра  $d$  с параметрами исследуемого материала, в данном случае меди ( $m = 1$  – магнитная проницаемость,  $\text{sig} = 55,8\text{e}6$  См/м – электрическая проводимость). На заданной индукции магнитного поля проводятся измерения тепловых потерь в медном проводнике при изменении частоты поля. Время нагрева проводника не влияет на результаты измерений и задается равным 1 сек.



а)

б)

Рис.1 – Зависимости тепловых потерь от частоты и индукции:  
 а) поперечного магнитного поля для провода диаметром 0,3мм;  
 б) продольного магнитного поля для провода диаметром 0,3мм

На рисунке 2 представлено отношение тепловых потерь в продольном магнитном поле к тепловым потерям в поперечном магнитном поле, из которого следует, что использование продольного поля для индукционного нагрева с увеличением частоты эффективнее. При этом, эффективность возрастает с увеличением частоты.

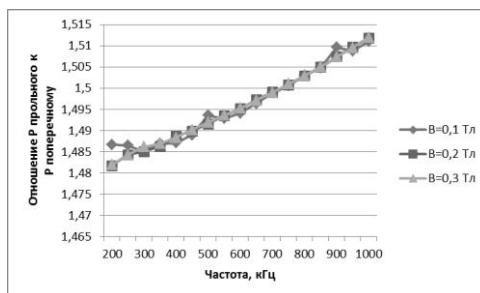


Рис.2 – Отношение тепловых потерь в продольном магнитном поле к тепловым потерям в поперечном магнитном поле.

В [4] дано выражение для расчета тепловых потерь на единицу поверхности как функция от частоты (на высоких частотах). Для определения адекватности модели сравним экспериментальные зависимости с расчетными. На рисунке 3а видно, что в диапазоне до 1МГц полученные зависимости имеют некоторое расхождение, но при увеличении частоты кривые совпадают (рисунк 3б).

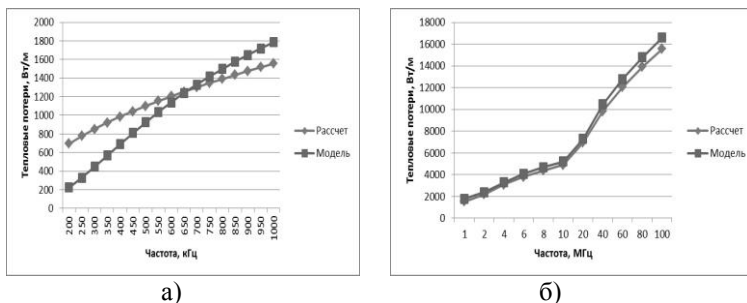


Рис.3 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных: а) в диапазоне 200кГц-1МГц; б) в диапазоне 1МГц-100МГц.

Некоторое расхождение результатов моделирования объясняется размером сетки. Уменьшение ячейки сетки ведет к повышению точности измерений. В целом, результаты модели являются приемлемыми для дальнейшего исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 **Вильямс Д. Дж., Траверс Г. Дж.** Основные принципы подбора источников питания для индукционного нагрева стержней и проволоки // Силовая электроника. – 2007. – № 3. – С. 100-105.
- 2 **Калашников С.Г.** Электричество / С.Г. Калашников. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624 с.
- 3 **Слухоцкий А.Е.** Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Ленинградское отделение : ЭНЕРГИЯ, 1974. – 265 с.
- 4 **Гудэ Ж.** Промышленная электроника / Ж. Гудэ. – М. : ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО, 1960. – 468 с.