

УДК 539.4-621.365.5

**А.Р. Лепешкин, С.А. Лепешкин***Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова Национальный исследовательский университет-Московский энергетический институт*

## **НОВЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ**

*Разработана конечно-элементная трехмерная модель для расчета электромагнитных и температурных полей и параметров индукторов при нагреве вращающихся дисков в программном комплексе ANSYS. Проведены исследования характеристик стержневых индукторов с учетом влияния зазора и частоты тока. Получен новый эффект при индукционном нагреве дисков, заключающийся в дополнительном выделении тепловой энергии в изделии за счет вращения. Проанализировано влияние частоты вращения на формирование мощности внутренних источников тепла во вращающемся диске с использованием стержневых и эллипсных индукторов.*

***Индукционный нагрев, вращающийся диск, дополнительная тепловая энергия, распределение температуры, индукторы***

### **Введение**

Одной из областей применения индукционного нагрева является реализация тепловых процессов в телах вращения для проведения разгонных и термоциклических испытаний дисков и бандажей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и турбин энергетических установок на разгонных и специализированных стендах [1-10]. Индукционный нагрев позволяет обеспечить высокие скорости нагрева и получить заданное неравномерное распределение температур по радиусу диска, соответствующего эксплуатационным условиям при испытаниях на разгонных стендах [1-5, 7-10]. Обычная система индукционного нагрева состоит из нескольких плоских кольцевых индукторов, расположенных на разных радиусах диска. Ее недостатками являются: невозможность получения дополнительной тепловой энергии за счет вращения (т.к. индукторы осесимметричные), дискретное расположение индукторов по поверхности диска ухудшает точность воспроизведения температурных полей изделий. Ранее использовались, в основном, аналитические методы и одно- или двухмерные численные методы расчета, а также физическое моделирование или натурные эксперименты по разработке индукторов. Указанные методы не позволяют учесть сложную геометрию системы индукционного нагрева, влияния вращения на распределение температуры и выделение мощности внутренних источников тепла в диске и требуют введения многих допущений, снижающих точность расчетов. Натурные эксперименты по нагреву вращающихся дисков на установках связаны с существенными материальными затратами и ограничивались по времени исследований.

При вращении деталей в магнитном поле в них наводится ЭДС и, таким образом, появляется дополнительная мощность внутренних источников тепла при определенных условиях в зависимости от формы индукторов. Однако ранее при расчетах систем индукционного нагрева вращающихся дисков, в том числе и на разгонных стендах вклад этого эффекта в нагрев не рассматривался и не оценивался.

Разработка расчетно-экспериментальной методики индукционного нагрева, основанной на 3D-моделях, с учетом нового эффекта - получения дополнительной тепловой энергии в дисках за счет вращения (дополнительного выделения мощности внутренних источников тепла) и обеспечения заданного температурного поля дисков является актуальной задачей. При термоциклических испытаниях максимальная частота вращения дисков может составлять 20000 - 70000 об/мин.

### **1. Теория**

Разрабатывается методика расчета режимов индукционного нагрева, трехмерные математические модели в программном комплексе ANSYS для расчета электромагнитных полей с учетом выделения дополнительной мощности внутренних источников тепла в дисках и моделирования распределения температуры по диску с учетом вращения. Минимальные частоты вращения определяются, при которых температура на любом радиусе диска была бы равномерной в окружном направлении при моделировании неравномерного распределения температуры диска в радиальном направлении.

Исследования влияния частоты вращения на выделение мощности внутренних источников теп-

ла в диске за счет двух составляющих ЭДС проводятся с использованием стержневых и плоских индукторов. Первая составляющая возникает на средней частоте тока в невращающемся диске. Вторая составляющая ЭДС наводится при вращении диска в электромагнитном поле, создаваемом индуктором, в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея. В результате чего дополнительно возникают индуцированные токи. На небольшой частоте вращения указанная составляющая мала. При увеличении частоты вращения увеличивается скорость изменения (пульсации) магнитного потока в диске и наведенная ЭДС (вторая составляющая) становится значимой в диапазоне больших частот вращения. В результате мощность дополнительных внутренних источников тепла увеличивается и повышается интенсивность индукционного нагрева вращающегося диска.

Таким образом, мощность  $P$  индукционного нагрева определяется по формуле

$$P = P_1 + P_2 \quad (1),$$

где  $P_1$  - мощность, выделяемая в диске за счет частоты тока, пропорциональна квадрату корню частоты тока,  $P_2$  - мощность, выделяемая в диске за счет вращения, пропорциональна экспоненциальной зависимости частоты вращения.

В данной работе впервые рассмотрен нагрев дисков, вращающихся в переменном электромагнитном поле, с учетом дополнительного выделения мощности внутренних источников на высоких частотах вращения.

При расчете параметров электромагнитного поля задаются свойства среды. Система уравнений Максвелла, представляет собой модель электромагнитного процесса. Эта модель лежит в основе как аналитических, так и численных методов расчета электромагнитных полей.

В математической модели системы диск-индуктор конечно-элементное решение электромагнитной задачи осуществляется с использованием формулировки магнитного векторного потенциала в программном комплексе ANSYS. Данная формулировка является узловой, она позволяет проводить анализ статических, гармонических и переходных задач и имеет три основные степени свободы. Ее преимуществом является возможность использования уравнений связи для интеграции двух разных сеток, несвязанных между собой (в частности для моделирования вращения).

## 2. Результаты исследований

Для уменьшения времени расчета, построение сетки конечных элементов проводилось с учетом глубины проникновения электромагнитной волны в материал, т.е. ближе к поверхности

объекта сетка была более густая по сравнению с центром. Построенная конечно-элементная сетка системы «индуктор-диск» содержит примерно 70000-150000 элементов. Геометрия указанной математической модели представлена на рис. 1 и 2.

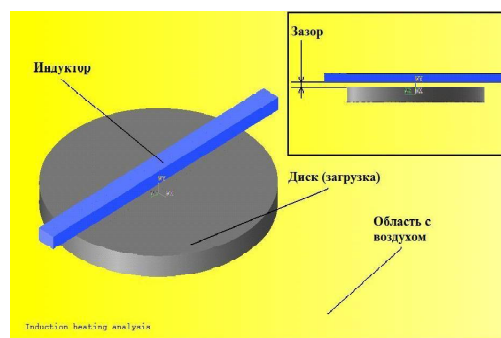


Рис. 1. Геометрическая модель системы «индуктор-диск»

Для электромагнитного расчета гармонической задачи в программном комплексе ANSYS использован трехмерный элемент SOLID97 (узловая постановка задачи). Другими словами использована форма элемента шестигранник («кирпич»). На внешних границах области воздуха было задано нулевое значение векторного магнитного потенциала, то есть предполагается, что на внешней границе модели, удаленной от источников, происходит полное затухание электромагнитного поля.

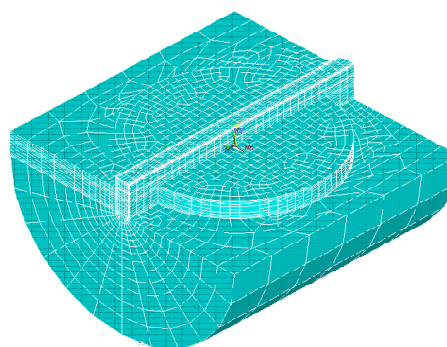
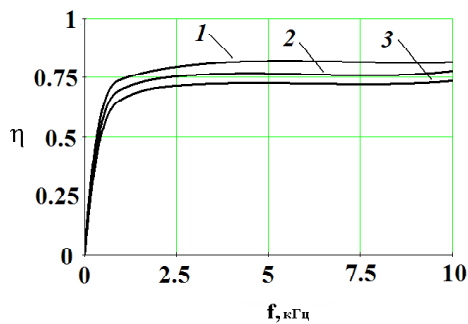


Рис. 2. Сетка конечных элементов системы «индуктор-диск» вместе с объемом воздуха (верхняя часть объема воздуха не представлена)

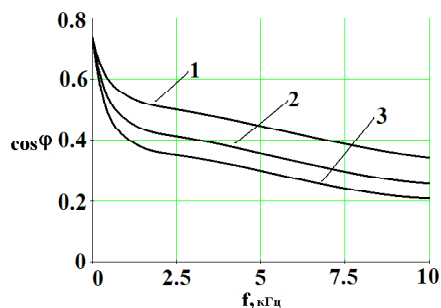
На всех участках внешней границы, где явно не указаны иные виды граничных условий, задано условие Неймана.

Исследования электрических и энергетических характеристик с применением стержневых индукторов проводились в системе индуктор-диск. Были проведены расчетные исследования влия-

ния зазора между индуктором и диском и частоты тока на основные электрические параметры стержневых индукторов: КПД и  $\cos\varphi$ . Расчеты производились на частотах  $f = 0,05 \div 8,00$  кГц. При этом использовались различные значения зазора между индуктором и диском 5÷15 мм. Ток индуктора 500 А. На рис. 3 изображены расчетные зависимости электрического КПД и  $\cos\varphi$  от частоты тока индуктора при зазорах: 5, 10 и 15 мм (соответственно кривые 1, 2, 3).



а)



б)

Рис. 3. Зависимости КПД (а) и  $\cos\varphi$  (б) от частоты при разных зазорах 5, 10 и 15 мм (соответственно кривые 1, 2 и 3)

Из графиков (рис. 3) видно, что при повышении частоты тока КПД увеличивается, а затем остается примерно постоянным. Таким образом, можно сделать вывод о неэффективности использования низких частот (0,05 – 1,00 кГц).

Проведены расчеты индукционного нагрева диска с вращением и без вращаения. При увеличении частоты вращения  $n$  увеличивается скорость изменения магнитного потока в диске и наведенная ЭДС. В результате мощность внутренних источников тепла увеличивается и повышается интенсивность индукционного нагрева вращающегося диска (см. кривая 2 на рис. 4). Результаты расчетов мощности, выделяющейся в

диске из никелевого сплава при индукционном нагреве с учетом вращения диска приведены на рис. 4. Параметры режима: ток – 500 А, частота – 2400 Гц, зазор – 10 мм. Также на рис. 4 представлена зависимость мощности  $I$ , выделяемой в диске без вращения. Значение  $P = 100\%$  соответствует мощности, выделяемой в неподвижном диске – 30 кВт.

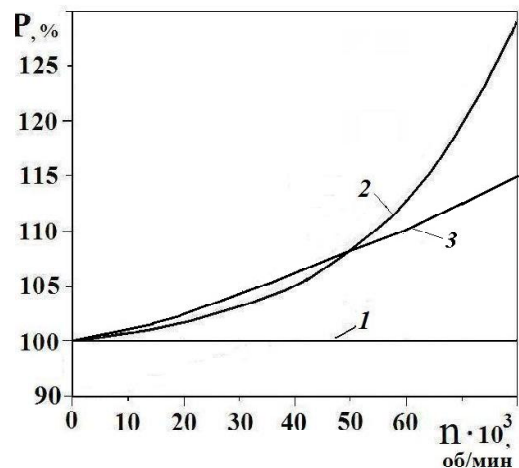


Рис. 4. Зависимость выделяемой мощности в диске от частоты вращения:

1 – без вращения, 2 – с учетом вращения (стержневой индуктор), 3 – с учетом вращения (эллипсный индуктор)

Из рис. 4 следует, что влияние наведенных за счет вращения диска токов, т.е. увеличение мощности внутренних источников теплоты становится существенным при частотах вращения выше 15000-20000 об/мин. Это является дополнительным фактором энергосбережения при проведении термоциклических испытаний дисков с использованием индукционного нагрева.

Все задачи, так или иначе связанные с индукционным нагревом, являются междисциплинарными, то есть для того, чтобы определить температурное поле в изделии, необходимо сначала решить электромагнитную задачу и найти внутренние источники теплоты в изделии. А затем уже на основе найденных внутренних источников теплоты определить распределение температурного поля в диске в заданный момент времени. Программный комплекс ANSYS позволяет решать связанные электромагнитные-тепловые задачи.

На основе разработанных моделей в комплексе ANSYS приводятся результаты расчетных исследований по моделированию с использовани-

ем разных индукторов распределений температур во вращающихся плоских дисках. В соответствии с методикой трехмерного расчета индукционного нагрева созданы конечно-элементные модели плоского диска и индуктора с учетом постоянного зазора между индуктором и поверхностью диска. При вращении наиболее эффективный нагрев достигается в тех кольцевых зонах диска, которые более длительное время находятся под участками индуктора. Следовательно, каждый такой участок индуктора характеризуется отношением его ширины к соответствующей кольцевой зоне нагрева. В данном случае ширина такого участка индуктора сложной формы определяется на основе его пересечения соответствующей кольцевой зоной нагрева. Указанные факторы учитывались в расчетных исследованиях распределений температур во вращающемся плоском диске с использованием двух эллипсных индукторов, расположенных с двух его сторон (рис. 5).

Так как указанная задача индукционного нагрева диска является многодисциплинарной, то для того, чтобы определить температурное поле, необходимо сначала решить электромагнитную задачу и найти внутренние источники теплоты в диске. А затем уже на основе найденных внутренних источников теплоты определить распределение теплового поля в диске. Для решения задачи созданы две независимые электромагнитная и тепловая модели с одинаковой геометрией. Для моделирования температурного поля использовался элемент SOLID90. Алгоритм решения связанной задачи осуществлялся с помощью ANSYS Multi-field Solver.

С использованием эллипсных индукторов (рис. 5), расположенных эквидистантно относительно поверхности диска с двух его сторон, были проведены расчетные исследования по моделированию неравномерного распределения температуры по радиусу диска постоянной толщины. Индукционный нагрев диска осуществлялся до максимальной заданной температуры 550 °С. Для всех индукторов ток был одинаковый - 500 А, частота тока 2400 Гц.

В результате решения электромагнитной задачи получены без вращения распределение внутренних источников тепла (рис. 6) и зависимость выделяемой мощности в диске от частоты вращения (кривая 3, рис. 4). До 50000 об/мин эллипсный индуктор более эффективен, чем стержневой индуктор. После решения тепловой задачи определено распределение температуры (рис. 7, 8) в диске с учетом вращения в переменном электромагнитном поле.

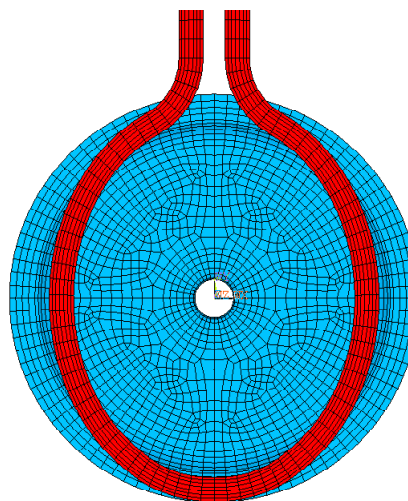


Рис. 5. Эллипсный индуктор

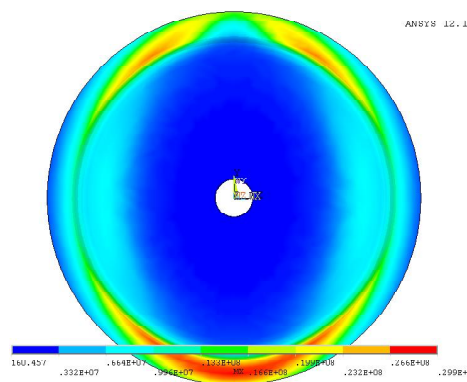


Рис. 6. Распределение удельной мощности нагрева в неподвижном диске

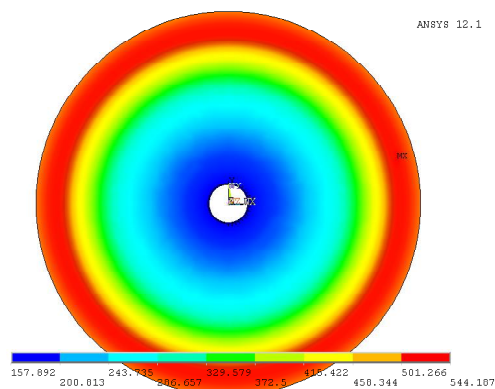


Рис. 7. Распределение температуры во вращающемся диске

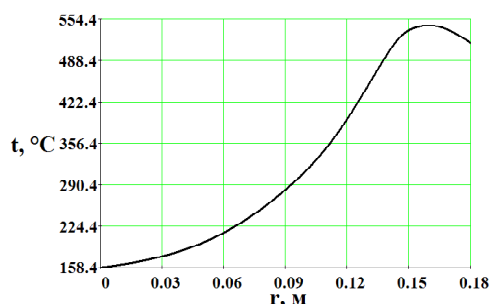


Рис. 8. Распределение температуры по радиусу вращающегося диска

### Заключение

Разработана конечно-элементная трехмерная модель для расчета электромагнитных и температурных полей параметров индукторов при нагреве вращающихся дисков в программном комплексе ANSYS.

Получены результаты исследований энергетических характеристик стержневых индукторов с учетом влияния зазора и частоты тока при нагреве дисков.

Получен новый эффект при индукционном нагреве дисков, заключающийся в дополнительном выделении тепловой энергии в изделии за счет вращения.

Проанализировано влияние частоты вращения на выделение мощности внутренних источников тепла во вращающемся диске с использованием разных индукторов.

Приведены результаты расчетных исследований распределений температур во вращающихся дисках с использованием стержневых и эллипсных индукторов.

В дальнейшем планируются расчетно-экспериментальные исследования по влиянию индукторов различной формы на выделение мощности внутренних источников тепла и на моделирование распределений температур во вращающихся дисках при испытаниях на разгонных стендах.

### Перечень ссылок

1. Патент № 2239582 Россия. Способ термоциклических и разгонных испытаний дисков турбомашин / А.Р. Лепешкин, В.А. Скибин 2004. Бюл. №25.
2. Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях: Монография / А.Р. Лепешкин, А.Б. Кувалдин - Новосибирск: Изд.-во НГТУ, 2006. - 286 с.
3. Лепешкин А.Р. Циклические испытания дисков ГТД на разгонном стенде с использова-

нием индукционного нагрева / А.Р. Лепешкин // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научных трудов. Тепловые двигатели и энергоустановки.* Харьков: Гос. аэрокосмический ун-т "ХАИ", - 2000. - Вып.19. - С. 456-460.

4. Лепешкин А.Р. Моделирование нестационарного теплового и термонапряженного состояния дисков и рабочих колес ГТД на разгонном стенде с использованием индукционного нагрева при неизотермических циклических испытаниях / А.Р. Лепешкин // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научных трудов.* - Харьков: Национальный аэрокосмический ун-т "ХАИ", - 2001. - Вып.23. Двигатели и энергоустановки. - С. 144-146.

5. Лепешкин А.Р. Индукторы для нагрева дисков ГТД при испытаниях на разгонных стендах / А.Р. Лепешкин // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научных трудов.* - Харьков: Национальный аэрокосмический ун-т "ХАИ", 2002. - Вып. 334. Двигатели и энергоустановки. - С. 163-165.

6. Лепешкин А.Р. Методика статического тензометрирования дисков ГТД на разгонных стендах с учетом неравномерного нагрева / А.Р. Лепешкин // *Авиационно-космическая техника и технология.* Харьков: Национальный аэрокосмический ун-т "ХАИ". 2003. - Вып. 41/6.. - С. 154-159.

7. Лепешкин А.Р. Метод термоуправляемого обрыва лопаток рабочих колес ГТД при испытаниях конструкций и корпусов на непробиваемость / А.Р. Лепешкин // *Авиационно-космическая техника и технология.* Харьков: Национальный аэрокосмический ун-т "ХАИ". 2005. - Вып. 4/20. - С. 77-82.

8. Лепешкин А.Р. Формирование испытательных циклов дисков ГТД при термоциклических испытаниях на разгонном стенде с использованием индукционного нагрева / А.Р. Лепешкин, С.А. Лепешкин // *Вестник двигателестроения.* - 2006. - № 3. - С. 121-125.

9. Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А. Многокритериальная оптимизация индукционного нагрева дисков ГТД при испытаниях на разгонном стенде / А.Р. Лепешкин., С.А. Лепешкин // *Авиационно-космическая техника и технология.* Харьков: Национальный аэрокосмический ун-т "ХАИ". 2007. - Вып. 8/44. - С. 156-164.

10. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А. Метод испытаний дисков турбомашин и бандажей роторов турбогенераторов с использованием индукционного нагрева/ А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин, С.А. Лепешкин // *Электричество.* 2009. - № 7. - С. 33-38.

Поступила в редакцию 01.06.2010 г.



**A.R. Lepeshkin, C.A Lepeshkin**

**NEW EFFECT AT INDUCTION HEATING OF ROTATING DISKS**

*Розроблено скінченно-елементну трьохвимірну модель для розрахунку електромагнітних і температурних полів і параметрів індукторів при нагріві дисків, що обертаються, у програмному комплексі ANSYS. Проведено дослідження характеристик стрижньових індукторів із урахуванням впливу зазору і частоти току. Отримано новий ефект при індукційному нагріві дисків, сутність якого становить додаткове виділення теплової енергії у виробі за рахунок обертання. Проаналізовано вплив частоти обертання на формування потужності внутрішніх джерел тепла у диску, що обертається, із використанням стрижньових і еліптичних індукторів.*

***Індукційний нагрів, диск, що обертається, додаткова тепла енергія, розподіл температури, індуктори***

*The finite-element three-dimensional model is developed for calculation of electromagnetic and temperature fields and inductor parameters at heating of rotating disks in program complex ANSYS. The investigations of characteristics of rod inductors in view of influence of a clearance and frequency of a current are carried. The new effect is received at induction heating the disks consisting in additional allocation of thermal energy in a product due to rotation. The influence of rotation frequency on formation of power of internal sources of heat in a rotating disk with use rod and ellipse inductors is analysed.*

***Induction heating, rotating disk, additional thermal energy, temperature distribution, inductors***