

УДК 539.4-621.365.5

А.Р. ЛЕПЕШКИН, С.А. ЛЕПЕШКИН

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия*

## ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО ЭФФЕКТА ПРИ НАГРЕВЕ ДИСКОВ, ВРАЩАЮЩИХСЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Разработаны трехмерные модели для расчета электромагнитных и температурных полей и параметров индукторов при нагреве вращающихся дисков в программном комплексе ANSYS. Проведено исследование нового эффекта 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 разных индукторов. Приведены результаты исследований распределений температур во вращающихся дисках с использованием разных конструкций индукторов и получена оптимальная форма индуктора.*

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, вращающийся диск, дополнительная тепловая энергия, распределение температуры, индукторы.

### Введение

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 – 8]. 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 двумерные 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.

Разработка расчетно-экспериментальной методики индукционного нагрева, основанной на трехмерных 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 проблемой.

### 1. Теория

Для обеспечения заданных распределений температур деталей необходимо решить задачи моделирования режимов нагрева вращающихся дисков в переменном электромагнитном поле с использованием индукторов различной конфигурации. Осуществляется нагрев с заданными тепловыми потоками.

Разработка и применение специальных и различных индукторов позволяет устранить местные градиенты температур, свойственные системам нагрева с дискретно расположенными индукторами, обеспечить требуемое распределение тепловых потоков и повысить точность воспроизведения заданного распределения температуры диска.

Авторами разработаны математические модели в программном комплексе ANSYS для расчета электрических, энергетических характеристик системы индукционного нагрева и моделирования режимов нагрева дисков с учетом вращения.

Исследования влияния частоты вращения на выделение мощности внутренних источников тепла в диске за счет двух составляющих ЭДС проведены

с использованием индукторов разной формы. Первая составляющая возникает в диске на средней частоте тока в переменном электромагнитном поле. Вторая составляющая ЭДС наводится в диске за счет вращения в переменном 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 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 удельная 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 электромагнитного поля;  $P_2$  – мощность, выделяемая в диске, за счет пульсаций магнитного потока при вращении детали в переменном электромагнитном поле.

Использование двух способов нагрева расширяет возможности управления процессом нагрева вращающихся деталей в переменном электромагнитном поле.

Таким образом, авторы впервые исследовали нагрев дисков, вращающихся в переменном электромагнитном поле.

При расчете параметров электромагнитного поля задаются свойства материалов диска и индуктора. Модель электромагнитного процесса решается с использованием системы уравнений Максвелла.

Возможность использования уравнений связи для интеграции двух разных сеток диска и индуктора, несвязанных между собой для моделирования вращения является преимуществом программного комплекса ANSYS.

## 2. Результаты исследований

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. кривые 2, 3 на рис. 1). Результаты расчетов мощности, выделяющейся в стальном диске при индукционном нагреве с учетом вращения диска приведены на рис. 1.

Параметры режима: ток – 500 А, частота – 2400 Гц, зазор – 10 мм.

Также на рис. 1 представлена зависимость мощности  $P$ , выделяемой в диске без вращения.

Из рис. 1 следует, что влияние наведенных за счет вращения диска токов, т.е. увеличение мощности внутренних источников теплоты становится существенным при частотах вращения выше 300-400 оборотов в секунду. Это является дополнительным фактором энергосбережения при проведении термодинамических испытаний дисков с использованием индукционного нагрева.

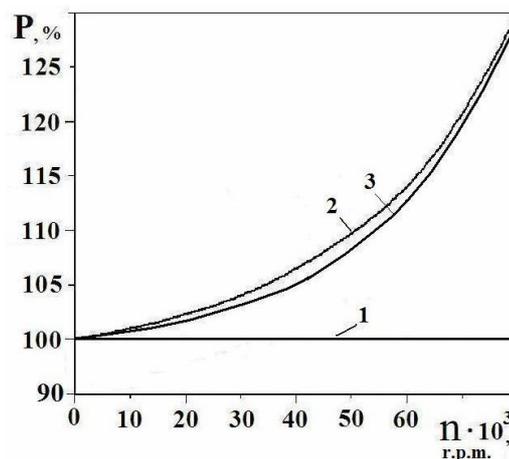


Рис. 1. Зависимости мощности, выделяемой в диске, от частоты вращения при вращении с петлевым индуктором (2) и со стержневым индуктором (3); 1 – мощность, выделяемая в диске, за счет частоты тока электромагнитного поля

Все задачи, так или иначе связанные с индукционным нагревом, являются междисциплинарными, то есть для того, чтобы определить тепловое 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.

Разработанные математические модели использованы в исследованиях по влиянию различной формы индукторов на распределения температур во вращающихся плоских дисках. В указанном расчете важен наибольший охват индуктором поверхности 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. Указан-

ные факторы учитывались в расчетных исследованиях по влиянию различной формы индукторов на распределения температур во вращающемся плоском диске при питании индукторов одинаковым током 500 А.

Расчеты тепловых режимов с помощью стержневых индукторов показали, что распределения температур во вращающихся дисках не соответствуют заданному распределению температуры.

На рис. 2 приведены кривые распределений температур с использованием индукторов разной формы: 1 – кольцевой индуктор, 2 – кольцевой индуктор со смещением относительно центра диска, 3 – эллипсный индуктор, 4 – эллипсный со смещением относительно центра диска, 5 – петлевой индуктор (в середине диска), 6 – петлевой индуктор (в зоне обода диска), 7 – заданное распределение температуры по технологии.

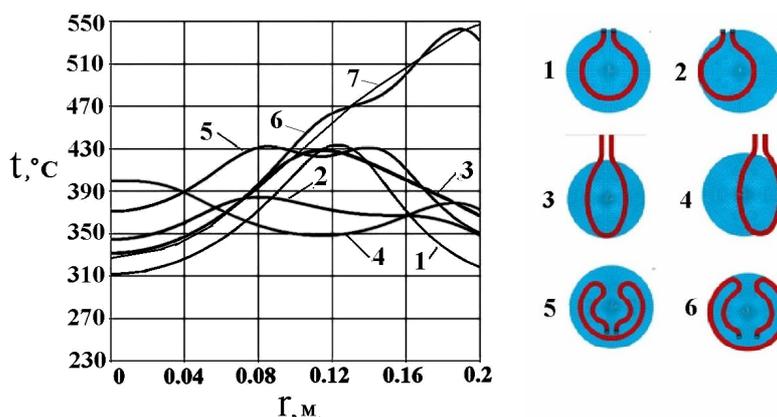


Рис. 2. Распределения температур по радиусу в зависимости от формы индуктора для плоского диска

Анализ распределений температур с использованием индукторов 2, 3, 4, 5, 6 показывает, что указанные индукторы можно применить для равномерного нагрева. Наибольшую равномерность нагрева обеспечивает индуктор 2, при нагреве которого достигается наименьший перепад температуры по радиусу диска. При расположении эллипсного индуктора 5 получается равномерность нагрева в 2 раза выше по сравнению с индуктором 4 данного типа. Петлевые индукторы можно использовать как для создания равномерного распределения температуры (5), так и для неравномерного – 6. Отклонения распределения 6 от заданного распределения 7 температуры по радиусу диска не превышают 4 °С.

На основании проведенных расчетов выбрана оптимальная конструкция индуктора – петлевой индуктор с криволинейной конфигурацией, который обеспечивает наилучшее приближение расчетного распределения температуры плоского диска к заданному.

### Заключение

Разработаны трехмерные модели для расчета температурных и электромагнитных полей и исследования нового эффекта при нагреве вращающихся дисков в программном комплексе ANSYS.

На основе проведенных исследований получены режимы нагрева дисков с учетом составляющих вы-

деления мощности в детали за счет частоты тока и частоты вращения детали в переменном электромагнитном поле. Указанные факторы расширяют возможности управления процессом нагрева вращающихся деталей в переменном электромагнитном поле.

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

### Литература

1. Пат. 2235982 Российская Федерация, МПК H02N 11/00. Способ термоциклических и разгонных испытаний дисков турбомашин / Лепешкин А.Р., Скибин В.А.; Заявитель и патентообладатель ЦИАМ. – № 2002132094/06; заявл. 29.11.2002; опубл. 20.05.2004, Бюл. 25.
2. Лепешкин А.Р. 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 использованием индукционного нагрева / А.Р. Лепешкин // *Авиационно-космическая техника и технология: сб. научных трудов*. – Х.: ГАКУ "ХАИ", 2000. – Вып. 19. *Тепловые двигатели и энергоустановки*. – 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.* – Х.: НАКУ “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.* – Х.: НАКУ “ХАИ”, 2002. – Вып. 34. Двигатели и энергоустановки. – С. 163-165.

6. 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.

7. Лепешкин А.Р. Многокритериальная оптимизация индукционного нагрева дисков ГТД при испытаниях на разгонном стенде / А.Р. Лепешкин, С.А. Лепешкин // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2007. – № 8 (44). – С. 156-164.

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

Поступила в редакцию 1.06.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., начальник отдела А.Н. Петухов, ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”, Москва, Россия.

## ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОГО ЕФЕКТУ ПРИ НАГРІВІ ДИСКІВ, ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ

*О.Р. Лепешкін, С.О. Лепешкін*

Розроблені тривимірні моделі для розрахунку електромагнітних і температурних полів і параметрів індукторів при нагріві дисків, що обертаються, в програмному комплексі ANSYS. Проведено дослідження нового ефекту при індукційному нагріві дисків, що полягає в додатковому виділенні теплової енергії у виробі за рахунок обертання. Проаналізований вплив частоти обертання на формування потужності внутрішніх джерел тепла в диску, що обертається, з використанням різних індукторів. Приведені результати досліджень розподілів температур в дисках, що обертаються, з використанням різних конструкцій індукторів і отримана оптимальна форма індуктора.

**Ключові слова:** індукційний нагрів, диск, що обертається, додаткова тепла енергія, розподіл температури, індуктори.

## NEW HEATING METHOD OF ROTATING DICKS WITH USE CONST MAGNETS

*A.R. Lepeshkin, S.A. Lepeshkin*

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.

**Key words:** induction heating, rotating disk, additional thermal energy, temperature distribution, inductors.

**Лепешкин Александр Роальдович** – чл.-корр. АЭН РФ, д-р техн. наук, проф., начальник сектора ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”, Москва, Россия, e-mail: lepeshkin@rtc.ciam.ru.

**Лепешкин Степан Александрович** – канд. техн. наук, сотрудник Информ-нано, Москва, Россия, e-mail: stepan111@yandex.ru.