

УДК 539.4

А.Р. ЛЕПЕШКИН, С.А. ЛЕПЕШКИН*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия***МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДИСКОВ ГТД ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РАЗГОННОМ СТЕНДЕ**

Рассматриваются проблемы повышения точности воспроизведения термонапряженного состояния дисков ГТД при разгонных термоциклических испытаниях. Приведены результаты исследований скоростных режимов индукционного нагрева дисков. Разработана расчетно-экспериментальная методика термоциклических испытаний с выбором частоты тока и скорости нагрева. Решена многокритериальная задача оптимизации индукционного нагрева дисков ГТД при испытаниях на разгонном стенде. Приведены результаты исследований и рекомендации по определению режимов индукционного нагрева при термоциклических испытаниях.

термонапряженное состояние, диски ГТД, индукционный нагрев, термоциклические испытания, разгонный стенд, частота тока, частота вращения, температура, моделирование, многокритериальная оптимизация

1. Формулирование проблемы

1.1. Постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. Детали турбин авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и установок подвергаются воздействию значительных механических и тепловых нагрузок в условиях эксплуатации.

Поэтому моделирование скоростных режимов нагрева и термонапряженного состояния вращающихся дисков имеет важное значение в связи с увеличением времени работы деталей ГТД на нестационарных режимах.

Средние скорости нагрева дисков турбин авиадвигателей в условиях эксплуатации составляют $0,2 \div 1,0$ К/с. При скорости более 1 К/с нагрев дисков является скоростным.

На отдельных участках нагрева в начале полетного цикла максимальные скорости нагрева дисков достигают $2 \div 5$ К/с.

Тепловые потоки в ободной части дисков составляют $300 \div 600$ кВт/м², а в зоне лопаток – $1000 \div 3000$ кВт/м². Температуры в ободной части дисков на рабочих режимах достигают $550 \div 750$ °С.

Испытательная техника разгонных стендов [1 – 12] позволяет проводить экспериментальные

исследования дисков и роторов турбомашин на прочность и долговечность и разрабатывать новые технологии создания конструкций дисков и роторов из разных материалов и экспериментально определять ресурс дисков и роторов турбомашин в авиадвигателестроении, энергетике и других отраслях машиностроения.

Технологический процесс нагружения диска при термоциклических испытаниях [1, 2, 8] на разгонном стенде заключается в разгоне диска до заданной максимальной частоты вращения с одновременным его нагревом, выдержке на максимальной частоте вращения при заданном температурном поле, торможении до заданной минимальной частоты вращения с одновременным охлаждением диска, выдержке на минимальной частоте вращения при минимальной заданной температуре, повторение указанных операций заданное число раз (циклов).

Моделирование термонапряженного состояния дисков турбин на разгонных и специализированных стендах в машиностроительной промышленности осуществляется с использованием различных методов нагрева. Индукционный нагрев является одним из наиболее перспективных методов, так как по

сравнению с другими методами он имеет важные преимущества, заключающиеся не только в получении заданного неравномерного распределения температур по радиусу диска, соответствующего эксплуатационным условиям, но и в обеспечении высоких темпов нагрева дисков при термоциклических испытаниях [1, 2, 8].

Для воспроизведения заданного распределения температур диска и эксплуатационных условий (скоростей нагрева и др.) при испытаниях на разгонном стенде необходимо решить сложную многокритериальную задачу с определением оптимальных режимов индукционного нагрева дисков и параметров системы индукционного нагрева.

1.2. Обзор публикаций и постановка задачи данного исследования. На разгонных стендах с использованием индукционного нагрева проводятся изотермические и термоциклические испытания (неизотермические эквивалентно-циклические испытания) дисков турбин (с диаметрами $d = 500 \div 2000$ мм) с воспроизведением эксплуатационных тепловых и механических нагрузок. Имитация условий эксплуатации наиболее полно учитывается при проведении термоциклических испытаний. Проведение таких испытаний имеет особенное значение для дисков транспортных газотурбинных двигателей в связи с частыми запусками и остановками в течение срока эксплуатации.

На разгонных стендах [1 – 12] в авиационной отрасли и на зарубежных фирмах широко применяются источники питания индукционного нагрева, работающие на частоте 2400 Гц.

Использование пониженной частоты тока (2400 Гц) при скоростных режимах индукционного нагрева [10 – 12] на стендах приводит к значительному снижению точности моделирования термонапряженного состояния дисков при термоциклических испытаниях.

Применение при термоциклических испытаниях на разгонных стендах для охлаждения дисков тур-

бин охлаждающего воздуха, имеющего нормальную температуру [10 – 12], снижает точность воспроизведения термонагружения, так как появляются дополнительные повреждения материала диска, не проявляющиеся в эксплуатации, из-за высокого перепада между температурой диска и температурой охлаждающего воздуха. Известно, что при эксплуатации диски газовых турбин охлаждаются воздухом, который направляется в турбину после одной из ступеней компрессора. Этот воздух имеет повышенную температуру и, контактируя с поверхностью высокотемпературной области диска турбины, не вызывает дополнительных термических повреждений материала.

Расчету индукционного нагрева дисков посвящено мало работ [10, 12]. В [10] использовался приближенный аналитический расчет температурного поля диска. В [12] приведена математическая модель численного расчета электромагнитных и тепловых полей при индукционном нагреве дисков. Однако она не учитывает дополнительного нагрева дисков при трении их поверхности о воздух в испытательной камере, влияния внутренних источников тепла на термонапряженное состояние дисков и другие факторы. Задачи оптимизации индукционного нагрева дисков в работах [10, 12] не решались.

В поставленной в работе задаче многокритериальной оптимизации и комплексного математического моделирования индукционного нагрева дисков с использованием переменной (повышенной) частоты тока для повышения точности воспроизведения термонапряженного состояния дисков при термоциклических испытаниях указанные выше факторы в полной мере учтены.

2. Результаты исследований

Из проделанного анализа следует, что на существующих разгонных стендах для обеспечения скоростных режимов нагрева и охлаждения изделий, повышения точности моделирования термонапря-

женного состояния и термомеханического нагружения необходимо продолжать совершенствовать методики испытаний и системы индукционного нагрева (повышать частоту тока, разрабатывать новые конструкции индукторов, применять тиристорные преобразователи частоты и стендовое оборудование) и системы управления нагревом и охлаждением дисков.

Для реализации эксплуатационных скоростных режимов нагрева и термонагружения дисков авиадвигателей с учетом проведенного анализа испытательного оборудования разработана методика [1, 2, 8] разгонных и термоциклических испытаний и усовершенствован разгонный стенд [2] с использованием индукционного нагрева.

В соответствии с возможностями испытательного оборудования стенда очень важен расчет и выбор режимов индукционного нагрева с учетом процессов трения, конвективного теплообмена и теплообмена излучением.

Для решения такой задачи разработана математическая модель в виде компьютерной программы. Алгоритм расчета теплового состояния диска в указанной модели основывается на методе конечных элементов с учетом сложных краевых условий индукционного нагрева, конвективного теплообмена, радиационного нагрева и распределения внутренних источников тепла в материале детали.

Рассмотрим более подробно специфику воспроизведения термонапряженного состояния вращающихся дисков турбин ГТД с учетом влияния внутренних источников тепла при термоциклических испытаниях.

С учетом эксплуатационных условий сформирован испытательный цикл термического и механического нагружения для проведения термоциклических испытаний диска.

В результате усовершенствования стендовой системы охлаждения испытуемый диск охлаждался потоком воздуха, температура которого отличалась

от температуры диска на допустимую величину. Поток воздуха для охлаждения диска подогревался до необходимой температуры с помощью специального электронагревателя и подавался в разгонную камеру при снижении частоты вращения. Заданное распределение температуры по радиусу диска на режиме $n_{\max}$ представлено на рис. 1. На рис. 2 показана циклограмма нагружения диска по частоте вращения и изменение температуры обода диска внутри испытательного термоцикла.

Нагрев диска при испытаниях обеспечивался системой индукционного нагрева, работающей на частоте 2400÷10000 Гц.

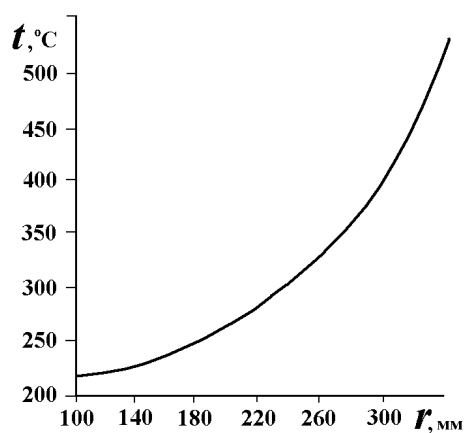


Рис. 1. Заданное распределение температуры по радиусу диска

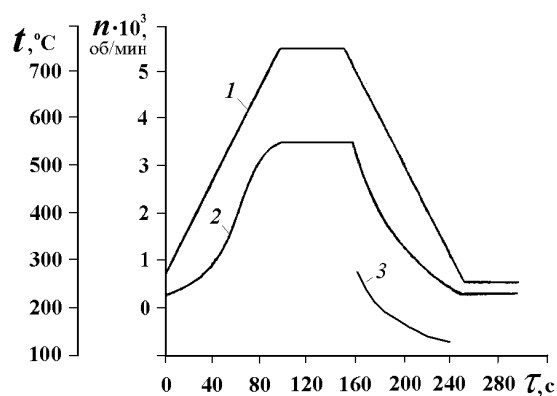


Рис. 2. Циклограмма изменения частоты вращения (1), температуры (2) обода диска, температуры (3) воздуха

С помощью разработанной математической модели были получены скоростные режимы индукци-

онного нагрева диска и необходимые параметры системы нагрева, использованные для воспроизведения заданного термического нагружения в соответствии с рис. 1 и 2 при испытаниях на стенде.

Кроме того, указанная математическая модель позволила выявить особенности скоростных режимов индукционного нагрева при испытаниях на разгонном стенде путем обработки экспериментальных данных по тепловому состоянию вращающихся дисков.

Математическое моделирование позволило имитировать изменения удельной мощности индукционного нагрева, температуры, и температурных напряжений в ободной части диска в процессе испытаний как на поверхности, так и по глубине материала диска внутри цикла нагружения (рис. 3, а, б, в).

На поверхности диска сжимающие температурные напряжения максимальны, а распределения температуры и температурных напряжений по глубине материала диска в начале режима $n_{\max}$ близко к линейному в пределах глубины проникновения тока Δ .

Несмотря на то, что индукционный нагрев позволяет достаточно точно воспроизводить нестационарные теплонпряженные состояния дисков, соответствующие заданным условиям, в испытаниях необходимо учитывать влияние частоты тока на экспериментальное моделирование их термонагружения.

Исследование этого влияния проводилось на основе математического моделирования температурного режима диска с учетом имеющихся экспериментальных данных в условиях поверхностного нагрева (газовый нагрев в условиях эксплуатации) и индукционный нагрев на частоте 2400 Гц. В результате были получены режимы тепловых потоков и термонапряженного состояния диска в разных условиях нагрева для обеспечения заданного циклического изменения температуры (рис. 2).

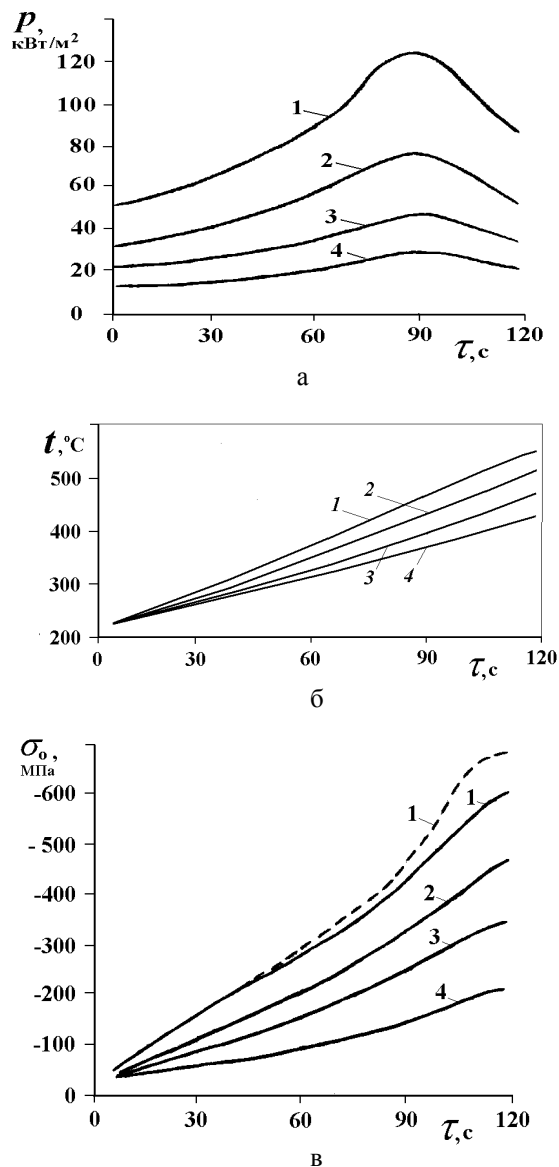


Рис. 3 Кривые изменения параметров в ободной части диска при термоциклических испытаниях: а – удельной мощности нагрева; б – температуры; в – окружных термонапряжений; 1' – при поверхностном нагреве; 1 – на поверхности диска при индукционном нагреве; 2 – глубина 2 мм; 3 – глубина 4 мм; 4 – глубина 6 мм

Из анализа результатов математического моделирования (рис. 3, в) следует, что термические напряжения на поверхности обода диска при индукционном нагреве максимально отличаются от заданных термических напряжений (в условиях поверхностного нагрева) на величину 60 МПа. При этом требовалась меньшая величина теплового потока на поверхности диска при индукционном нагреве за

счет внутренних источников тепла, чем при поверхностном нагреве.

Воспроизведение одинакового теплового потока на поверхности диска в условиях поверхностного нагрева и индукционного нагрева приведет к разному тепловому состоянию и к еще большему различию в моделировании термонапряженного состояния (100 МПа).

Для повышения точности в моделировании термонапряженного состояния дисков в условиях индукционного нагрева требуется совершенствование расчетно-экспериментальных методов проведения испытаний.

Очевидно, что одним из таких методов является выбор частоты тока для обеспечения заданного режима. Для этого воспользуемся снова математическим моделированием и ранее полученными результатами (рис. 3). Проведем серию расчетов скоростного индукционного нагрева и термонапряженного состояния диска для разных частот тока, обеспечивая заданное распределение температуры диска (рис. 1) в сравнении с поверхностным нагревом.

В итоге получим кривые (рис. 4) разности (погрешности воспроизведения) термических напряжений при индукционном (глубинном) и поверхностном нагреве в зависимости от частоты при разных скоростях нагрева. Указанные кривые имеют экспоненциальный характер. Из анализа рис. 4 видно, что для обеспечения режима нагрева на ободе диска требуется повысить частоту тока до 10÷15 кГц. В этом случае будет обеспечено воспроизведение термонапряженного состояния с разностью (погрешностью) 10÷20 МПа.

Полученные результаты математического моделирования были использованы при испытаниях диска ГТД при скоростном индукционном нагреве с источниками переменной частоты – тиристорными преобразователями.

Влияние частоты тока на моделирование нестационарного термонапряженного состояния дисков

целесообразно рассматривать комплексно с учетом конкретной скорости их нагрева при циклическом нагружении. Проведем аналогичные расчеты скоростных режимов нагрева и термонапряженного состояния диска для разных скоростей нагрева, обеспечивая заданное распределение температуры (рис. 5). На основе проведенных расчетов построены кривые (рис. 5) разности термических напряжений (при индукционном и поверхностном нагреве) в зависимости от скорости нагрева диска при разных частотах тока. Анализ полученных данных (рис. 5) показывает, что существует некоторая скорость нагрева ν' (≈ 3 К/с), при которой указанная разность максимальна. При других скоростях нагрева эта разность уменьшается. Особенно интенсивно она уменьшается при $\nu > \nu'$, т.е. в области более высоких скоростей нагрева.

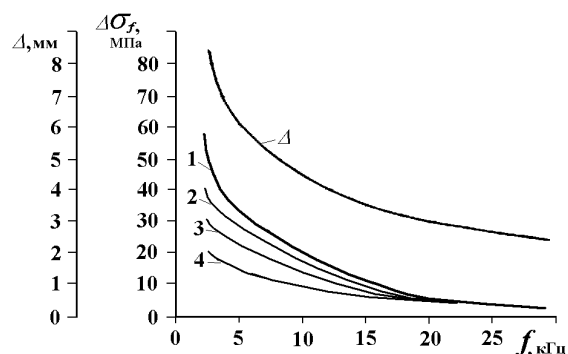


Рис. 4. Влияние частоты тока на воспроизведение термонапряженного состояния в ободной части диска при достижении заданного распределения температур: Δ – глубина проникновения тока; кривые разности термонапряжений в условиях поверхностного и индукционного нагрева при разных скоростях нагрева, К/с:
1 – $\nu = 3$; 2 – $\nu = 1,8$; 3 – $\nu = 1,5$; 4 – $\nu = 1,1$

Погрешность воспроизведения термонапряженного состояния другого диска турбины ГТД была снижена до 10 МПа, так как в соответствии с заданной программой ускоренных испытаний и использованием возможностей системы индукционного нагрева была повышена скорость нагрева до 10 К/с. В связи с этим, влиянием внутренних ис-

точников тепла при нестационарном нагреве (на частоте тока 2400 Гц) указанного диска можно было пренебречь (рис. 5).

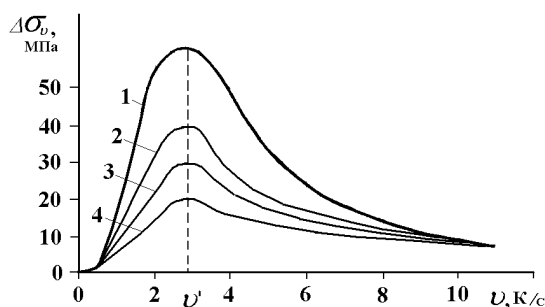


Рис. 5. Влияние скорости нагрева на воспроизведение термонапряженного состояния в ободной части диска при достижении заданного распределения температур: кривые разности термонапряжений в условиях поверхностного и индукционного нагрева в зависимости от скорости нагрева при разных частотах тока, Гц; 1 – 2400, 2 – 4000; 3 – 8000; 4 – 10000

На примерах исследуемых дисков показано, что учет особенностей скоростного индукционного нагрева и режимных факторов позволяет повысить точность воспроизведения термонапряженного состояния дисков при термоциклических испытаниях.

В процессе испытаний необходимо управлять мощностью нагрева, поступающей в нагреваемое изделие. В качестве источников тока повышенной частоты применяются электромашинные или тиристорные преобразователи. Система нагрева с питанием от электромашинного преобразователя обладает рядом недостатков, одним из которых является невозможность раздельного управления мощностью в индукторах.

На данном разгонном стенде были внедрены источники питания переменной частоты – три тиристорных преобразователя с рабочей частотой 2÷10 кГц, каждый мощностью по 100 кВт, собранных по схеме последовательного резонансного инвертора. Для увеличения числа каналов управления применен частотно-импульсный способ регулирования мощности, при котором нагрузкой каждого преобразователя служат два последовательно соединенных

колебательных контуров; перевод мощности из одного контура в другой достигается изменением рабочей частоты инвертора. Каждый нагрузочный контур образован согласующими трансформаторами ТЗ-800 с подключенными ко вторичной обмотке индукторами и батареей компенсирующих емкостей.

Контроль температур диска осуществляется с помощью термопар или пирометров (фотодиодов). Управление ТПЧ осуществляется путем изменения его рабочей частоты с выбором одной из двух фиксированных частот.

При управлении процессом нагрева сигналы с термопар обрабатываются системой управления, которая воздействует на рабочую частоту и выходную мощность ТПЧ.

Для управления температурным полем в общем случае используются три ТПЧ, обеспечивающих нагрев в шести зонах диска. Возможно использование двух, одного ТПЧ или одного канала любого ТПЧ. Поддержание заданной температуры в зоне диска осуществляется методом регулирования по соответствующему каналу.

Система многозонного индукционного нагрева предназначена для создания и регулирования температурного поля сложной конфигурации в металлическом изделии (диске). Поле создается путем нагрева отдельных зон изделия с помощью индукторов, питаемых токами повышенной частоты. Индукторы совместно с согласующими трансформаторами и батареями коммутающих конденсаторов образуют параллельные колебательные контуры, питаемые от тиристорных преобразователей частоты. Такая структура системы позволяет осуществить раздельное управление мощностью в каждой зоне нагрева с целью стабилизации ее температуры. Однако процесс воспроизведения температурного поля диска при скоростном индукционном нагреве осложняется из-за магнитной связи между индукторами соседних зон.

Действие магнитной связи заключается во взаимном переносе энергии между контурами, что нарушает регулирование мощности нагрева и ухудшает режим работы источников питания. В отключенном от источника контуре наводятся токи, которые при определенных условиях могут достигать величин, достаточных для продолжения нагрева. Для тиристорных преобразователей связь с соседними индукторами равносильна появлению в нагрузочной цепи источников ЭДС с амплитудой, пропорциональной величине магнитной связи, что проявляется в возникновении бийений токов и напряжения. Магнитная связь искажает энергетические характеристики нагрузочных контуров, что необходимо учитывать при выборе рабочих частот источников питания.

Проведены исследования по повышению эффективности системы индукционного нагрева с источниками переменной частоты с учетом влияния магнитных связей на перераспределение мощности между каналами управления мощностью нагрева при регулировании температурного поля изделий и дисков.

Для определения оптимальных удельных мощностей нагрева в различных зонах вращающегося диска и частот тока в индукторах (подключенных к источникам переменной частоты) необходимо решить задачу многокритериальной оптимизации многозонного индукционного нагрева, состоящую из нескольких критериев: критерия минимального отклонения распределения температуры диска от заданного, критерия минимального отклонения распределения термонапряжений диска от заданного и критерия определения оптимальных коэффициентов распределения мощности и магнитной связи в контурах тиристорных преобразователей.

Указанные целевые (критериальные) функции зависят от частоты тока и от других параметров и представлены в следующей постановке:

$$\Phi_1 = \sum_{j=1}^{j=n} \sum_{i=1}^{i=m} (t_{зад,i} - t_i(p_i(f, \delta_i)))^2 \Rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\Phi_2 = \sum_{j=1}^{j=n} \sum_{i=1}^{i=m} (\sigma_{зад,i} - \sigma_i(t_i, f_i))^2 \Rightarrow \min; \quad (2)$$

$$\Phi_3 = \sum_{j=1}^{j=n} (\vartheta - \alpha_P(\kappa_{CB}, f))^2 \Rightarrow \min; \quad (3)$$

$$\Phi_4 = \sum_{j=1}^{j=n} \sum_{i=1}^{i=m} W_{i,j}(p_{i,j}, \tau) \Rightarrow \min, \quad (4)$$

где i – номер индуктора или зоны нагрева;

j – номер источника переменной частоты;

m – количество зон нагрева;

n – количество источников переменной частоты;

t_i – расчетная температура зоны поверхности детали;

$t_{зад,i}$ – заданная температура зоны поверхности детали;

p_i – удельная мощность индукционного нагрева;

δ_i – зазор;

ϑ – константа;

κ_{CB} – коэффициент магнитной связи,

α_P – коэффициент распределения мощности,

W – расход электроэнергии.

На указанные целевые функционалы в виде неравенств линейного вида наложены ограничения: на максимальные мощности в индукторах, скорости нагрева, зазоры между индукторами и поверхностью диска, размеры индукторов, частоты тока в индукторах, коэффициенты распределения мощности и коэффициенты магнитной связи между индукторами.

Указанная многокритериальная задача решается комплексным методом оптимизации (методом Бокса). Данный метод является итерационным и является модификацией метода Нелдера-Мида. В методе Бокса на каждой итерации выбор множества (комплекса точек) осуществляется с использованием случайных процессов.

По результатам оптимизационных расчетов можно оценить эффективность регулирования мощности в исследуемом контуре. На рис. 6 приведены зависимости собственных резонансных частот контуров от коэффициента магнитной связи для различного отношения рабочих частот f_1 и f_2 , при типичном значении затухания $k_z = 0,25$. Получено, что эффективное регулирование мощности возможно при определенных значениях коэффициента распределения α_p .

При полученном минимальном значении $\alpha_p = 4$ кривая ограничения резонансных частот в зависимости от коэффициента связи $k_{св}$ приведена на рис. 6.

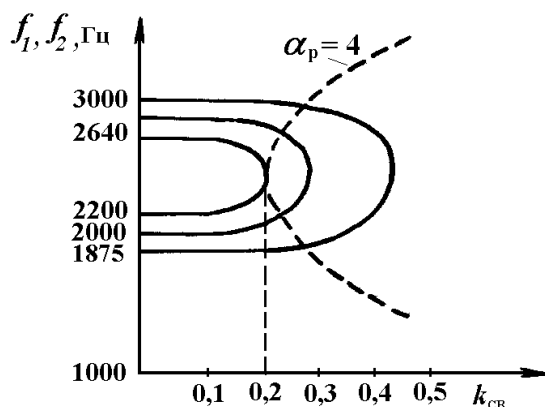


Рис. 6. Зависимости резонансных частот контуров от коэффициента магнитной связи

На рис. 7 приведено полученное расчетное распределение частоты тока по радиусу диска, которое было использовано при скоростном индукционном нагреве с ТПЧ при термоциклических испытаниях.

Для проверки расчетной эффективности регулирования мощности в контурах была экспериментально исследована зависимость коэффициента распределения мощности от отношения рабочих частот при коэффициенте магнитной связи $k_{св} = 0,1 \div 0,3$, коэффициенте затухания $k_z = 0,2$ на частотах $2 \div 10$ кГц. Результаты эксперимента не противоречат оптимизационным расчетам.

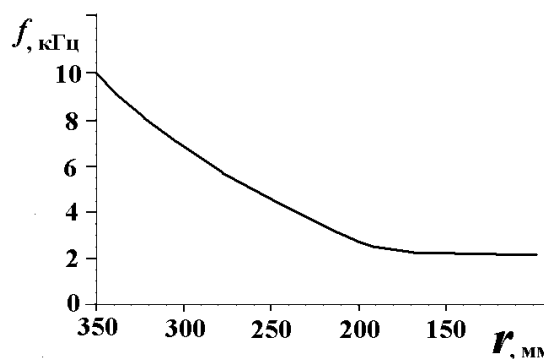


Рис. 7. Распределение частоты тока по радиусу диска

Заключение

На основе проведенных исследований и оптимизации многозонного индукционного нагрева повышена эффективность системы индукционного нагрева дисков с источниками переменной частоты и регулирования скоростных режимов индукционного нагрева изделий и повышена точность воспроизведения термонапряженного состояния дисков авиадвигателей при термоциклических испытаниях на разгонном стенде.

Полученные рекомендации и результаты исследований могут найти широкое применение при термоциклических испытаниях деталей с использованием скоростных режимов индукционного нагрева в различных отраслях машиностроения.

Литература

1. Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях: Монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 286 с. – (Серия «Современные электротехнологии»).
2. Пат. № 2235982 Россия. Способ термоциклических и разгонных испытаний дисков турбомашин / А.Р. Лепешкин, В.А. Скибин. 2004. Бюл. № 25.
3. Лепешкин А.Р., Безносенкова В.Н. Циклические испытания дисков ГТД на разгонном стенде с использованием индукционного нагрева // Авиаци-

онно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т “ХАИ”. – 2000. – Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 456-460.

4. Лепешкин А.Р., Безносенкова В.Н. Моделирование нестационарного теплового и термонапряженного состояния дисков и рабочих колес ГТД на разгонном стенде с использованием индукционного нагрева при неизотермических циклических испытаниях // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Х.: 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. // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Х.: Национальный аэрокосмический ун-т “ХАИ”.* – 2002. – Вып. 34. Двигатели и энергоустановки. – С. 163-165.

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

7. Лепешкин А.Р., Бычков Н.Г. Метод термуправляемого обрыва лопаток рабочих колес ГТД при испытаниях конструкций и корпусов на непробиваемость // *Авиационно-космическая техника и технология: Научн. техн. журн.* – 2005. – Вып. 4/20. – С. 77-82.

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

9. Лепешкин А.Р. Методика эксплуатационного термомеханического нагружения дисков турбомашин при ресурсных испытаниях на разгонном стенде // *Прочность и надежность нефтегазового оборудования: Докл. научн.-техн. сем. (19-20 сентября 2000).* – М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2001. – С. 112-114.

10. Демьянушко И.В., Суржин В.С. Проблемы автоматизированных циклических испытаний дисков и роторов на разгонных стендах // *Проблемы прочности.* – 1981. – № 7. – С. 110-115.

11. Данилушкин А.И., Еленевский Д.С., Котенев В.И. АСУ процессами многофакторных испытаний на специализированном стенде для прочностной доводки элементов конструкций // *Проблемы прочности.* – 1990. – № 5. – С. 116-119.

12. Данилушкин А.И. Моделирование электромагнитных и тепловых полей при ускоренных термоциклических испытаниях дисков ГТД на автоматизированных стендах // *Изв. вузов. Электромеханика.* – 1996. – № 5-6. – С. 109-113.

Поступила в редакцию 2.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Фишгойт, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва.