

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ
И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
О РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРАХ
В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД
С САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА ДАТЧИК**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ
И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
О РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРАХ
В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД
С САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА ДАТЧИК**

Под общей редакцией
О.П. СКОБЕЛЕВА

САМАРА
Издательство «НОВАЯ ТЕХНИКА»
2021

УДК 621.452.3
ББК 31.16
М54

Печатается по решению Ученого совета Института проблем управления сложными системами Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В.П. Данильченко
д-р техн. наук, проф. А.А. Трофимов

Авторы: В.Н. БЕЛОПУХОВ, С.Ю. БОРОВИК, П.Е. ПОДЛИПНОВ,
Ю.Н. СЕКИСОВ, О.П. СКОБЕЛЕВ

М54 Методы и средства измерения и обработки информации о радиальных зазорах в проточной части ГТД с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлипнов и др.; под общ. ред. О.П. Скобелева - Самара: Изд-во «Новая техника», 2021. – 142 с., ил.

ISBN 978-5-88940-156-8

Рассматриваются новые методы и реализующие их средства измерения и обработки информации о радиальных зазорах и осевых смещениях в газотурбинных двигателях на основе применения оригинальных одновитковых вихретоковых датчиков с чувствительными элементами в виде отрезка проводника. Методы предусматривают самокомпенсацию температурных воздействий на каждый из используемых датчиков, что позволяет сократить количество первичных преобразователей и, как следствие, число требуемых установочных отверстий на статорной оболочке двигателя. Приводятся результаты исследований функций преобразования датчиков и измерительных цепей, а также исследуется влияние ряда мешающих факторов на преобразование радиальных и осевых смещений торцов лопаток. Предлагаются принципы построения систем измерения с самокомпенсацией температурных воздействий на датчики и приводятся результаты экспериментальных исследований макета такой системы.

Книга адресована специалистам в области измерения, диагностики и испытаний газотурбинных двигателей и может быть интересна разработчикам лопаточных энергосиловых установок и студентам соответствующих специальностей вузов.

**УДК 621.452.3
ББК 31.16**

ISBN 978-5-88940-156-8



9 785889 401568

© В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлипнов,
Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев, 2021
© Институт проблем управления сложными системами
Российской академии наук – обособленное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Самарского федерального исследовательского центра
Российской академии наук, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Сокращения	5
Введение	6
Раздел 1 Методы измерения и обработки информации	
о радиальных зазорах	11
1.1. Идея самокомпенсации температурных воздействий на ОВТД в методе измерения радиальных зазоров	12
1.2. Методы обработки, обеспечивающие самокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД	16
1.2.1. Метод определения усредненного значения кода в межлопаточных промежутках	17
1.2.2. Метод определения экстремальных значений разностных кодов по каждой лопатке за один период вращения РК	18
1.3. Методы обнаружения опасных деформаций лопаток	22
1.4. Кластерный метод измерения и обработки информации о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток	25
Заключение к разделу 1	31
Раздел 2 Функции преобразования одновиткового вихретокового датчика и измерительной цепи	34
2.1. Семейства функций преобразования одновитковых вихретоковых датчиков	35
2.2. Семейства функций преобразования измерительной цепи	45
Заключение к разделу 2	58
Раздел 3 Принципы построения систем измерения и обработки информации с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД.....	61
3.1. Структурно-функциональные схемы систем измерения.....	61
3.2. Алгоритмы функционирования систем	65
Заключение к разделу 3	75
Раздел 4 Влияние мешающих факторов	78
4.1. Влияние соседних лопаток	79
4.2. Влияние температуры контролируемой и соседних лопаток	88

4.3. Влияние осевых смещений.....	98
Заключение к разделу 4.....	103
Раздел 5 Погрешности системы измерения	105
5.1. Погрешности, связанные с «недокомпенсацией» температурных воздействий на ОВТД.....	105
5.2. Погрешности дискретизации	108
5.2.1. Максимально возможные погрешности дискретизации	108
5.2.2. Случайная погрешность дискретизации.....	113
Заключение к разделу 5	116
Раздел 6 Действующий макет системы измерения радиальных зазоров. Результаты экспериментальных исследований	118
6.1. Технические средства и программное обеспечение.....	118
6.2. Метрологические показатели.....	120
6.3. Оценка работоспособности действующего макета системы	123
6.3.1. Имитация объекта.....	124
6.3.2. Изменения кодов на выходе ИЦ в процессе вращения РК..	126
6.3.3. Оценка работоспособности системы по разности заданных и вычисленных значений РЗ.....	130
6.3.4. Оценка работоспособности усреднения разностных кодов на нескольких периодах вращения РК для уменьшения случайных погрешностей.....	130
Заключение к разделу 6	133
Список литературы.....	136

СОКРАЩЕНИЯ

АЦП	– аналого-цифровой преобразователь	ПР	– преобразователь
ГСП	– горячий спай термопары	ПТН	– преобразователь ток-напряжение
ГТД	– газотурбинный двигатель	ПЭВМ	– персональная электронно-вычислительная машина
ГХ	– градуировочная характеристика	РЗ	– радиальный зазор
г.ц.кл	– геометрический центр кластера	РК	– рабочее колесо
г.ц.л.	– геометрический центр лопатки	СД	– соседняя лопатка
ДЧВ	– датчик частоты вращения	СКО	– среднеквадратическое отклонение
ИОВТД	– имитатор одновиткового вихретокового датчика	СТ	– согласующий трансформатор
ИЦ	– измерительная цепь	СФС	– структурно-функциональная схема
КЛ	– контролируемая лопатка	ТВ	– токовод
МК	– микроконтроллер	ТП	– термопара
МНК	– метод наименьших квадратов	ТС	– технические средства
МО	– математическое ожидание	УВВ	– устройство ввода-вывода
МУс	– масштабирующий усилитель	УН	– устройство нормализации
МФ	– мешающий фактор	ФВ	– функция влияния
ОВ	– объемный виток	ФП	– функция преобразования
ОВТД	– одновитковый вихретоковый датчик	ЧЭ	– чувствительный элемент
ОС	– осевое смещение	ЭКМП	– экстремумы кодов в межлопаточном промежутке
ПО	– программное обеспечение	ЭМВ	– электромагнитное взаимодействие

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что основные показатели надежности и экономичности газотурбинных двигателей (ГТД), которые применяются в транспортных средствах, электроэнергетике, газоперекачке, в основном определяются величиной радиальных зазоров (РЗ) между статорной оболочкой и торцами лопаток рабочего колеса (РК) компрессора и турбины. Поэтому до сих пор остается актуальной идея измерения РЗ непосредственно в газоздушном тракте и использования полученных результатов в системе управления и диагностики опасных состояний ГТД.

Однако, несмотря на существующее многообразие методов измерения РЗ, их реализация ограничена тяжелыми и даже экстремальными условиями измерения в газоздушном тракте. При этом одним из наиболее значимых мешающих факторов (МФ) является температура, достигающая более 600 °С в компрессоре и 1000 °С в турбинах ГТД.

Вместе с тем, прошли успешную апробацию в стендовых испытаниях ГТД компьютеризированные системы измерения РЗ, в которых использованы одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника. ЧЭ безиндуктивными токовыми (ТВ) связан с объемным витком (ОВ) согласующего трансформатора (СТ), эквивалентная индуктивность первичной обмотки которого является информативным параметром, зависящим от РЗ. ЧЭ, как и другие элементы конструкции ОВТД (ТВ и ОВ), выполнен из тех же жаропрочных сплавов, что и лопатки. Через установочное отверстие ЧЭ вводится непосредственно в проточную часть, где взаимодействует с торцами лопаток, причем изменения РЗ преобразуются в изменения информативного параметра ОВТД – эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ (СТ и ОВ размещены вне статорной оболочки ГТД в наиболее благоприятных температурных условиях).

Для уменьшения влияния температурных воздействий на элементы конструкции ОВТД в системах измерения РЗ используется дополнительный ОВТД–свидетель, ЧЭ которого через отдельное установочное отверстие

вводится в проточную часть с таким расчетом, чтобы температурные условия были идентичны с условиями ЧЭ рабочего ОВТД, а электромагнитного взаимодействия с торцами лопаток не происходило. При этом ОВТД–свидетель включается в общую измерительную цепь (ИЦ) с рабочим ОВТД, где выполняет компенсационные функции. Более подробные сведения о таких системах измерения, ее компьютеризации и полученных результатах можно найти в монографии [1], но при этом следует иметь в виду важное допущение, принятое в системах измерения при обработке информации, полученной с ОВТД: предполагалось, что изменения РЗ вызывают упругие и температурные деформации РК только в одном (радиальном) направлении, а изгибные и угловые деформации пера лопаток, как и осевые смещения РК, отсутствуют.

Однако в реальных условиях торцы лопаток совершают сложное многомерное движение, и смещение в радиальном направлении, от которого зависит РЗ, является лишь одной из координатных составляющих, а информативный параметр ОВТД реагирует на изменения всех координатных составляющих, и для получения достоверной информации о РЗ с помощью ОВТД необходима информация об остальных составляющих. Поэтому достаточно очевидной оказалась необходимость разработки методов получения информации о координатах смещений торцов лопаток, отличительной особенностью которых является применение кластера (группы) ОВТД с определенной ориентацией и различным размещением ЧЭ относительно торцов лопаток, причем число ОВТД в кластере должно быть равным числу искомым координат смещений. Такие методы получили название кластерных, и их наиболее полное описание, равно как и описание реализующих эти методы систем измерения, нашло отражение в более поздней монографии [2].

Дальнейшее развитие кластерные методы получили в монографии [3]. В отличие от ранее разработанных и применяемых, как правило, в компрессорах, эти методы ориентированы исключительно на турбины, причем наиболее современные и перспективные, в которых используются лопатки сложной формы (с повышенной кривизной поверхности пера в головной части и наличием выступов в торце лопатки)¹.

¹ Необходимо еще раз подчеркнуть, что кластерные методы [2, 3], используемые для измерения РЗ, позволяют уменьшить влияние осевых смещений РК, изгибных и угловых деформаций пера лопаток, действующих как МФ. Вместе с тем перечисленные МФ могут быть предметом экспериментальных исследований разработчиков ГТД в процессе их стендовых испытаний.

Следует отметить, что разработка кластерных методов, их реализация и всесторонние исследования выполнялись в Институте проблем управления сложными системами Российской академии наук по планам, утвержденным Отделением энергетики машиностроения и процессов управления РАН при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Результаты работы оказались востребованы и в последующие годы. Это, в частности, касается моделей электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ с торцевой частью не только контролируемой, но и соседних лопаток, используемых для получения функций преобразования ОВТД и ИЦ, а также оценки влияния МФ [3].

Необходимо подчеркнуть, что впервые задача измерения РЗ и использования полученной информации в системах управления и диагностики ГТД была сформулирована около трех десятилетий тому назад Генеральным конструктором ГТД академиком Н.Д. Кузнецовым, его учениками и коллегами по работе. А первые системы измерения РЗ апробировались в процессе испытаний ГТД, разработанных и изготовленных в организациях, руководимых Н.Д. Кузнецовым. Он был одним из основателей филиала Института машиноведения Академии наук (ныне Институт проблем управления сложными системами) и активно поддерживал работы, связанные с измерением РЗ как одного из основных направлений научных исследований и их реализаций.

Однако, несмотря на многократное применение ранее разработанных методов и средств измерения РЗ в экспериментальных исследованиях ГТД в процессе стендовых испытаний, одним из основных препятствий к их использованию в штатной эксплуатации ГТД (в составе систем управления и диагностики) оказались дополнительные ОВТД-свидетели, выполняющие компенсационные функции в ИЦ для уменьшения влияния температурных воздействий на рабочий ОВТД, а точнее дополнительные установочные отверстия в статорной оболочке для ОВТД-свидетелей, число которых в штатной эксплуатации ГТД предельно ограничено (существуют и трудности в подборе пары ОВТД с идентичными параметрами, которые связаны с применяемой технологией изготовления ОВТД).

Вместе с тем в период с 2016 до 2019 гг. были разработаны новые методы измерения и обработки информации о РЗ, которые обеспечивают не

только самокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД, но и обнаружение опасных состояний лопаток в реальном времени (с помощью «бортового» вычислительного устройства, например, микроконтроллера (МК)).

Результаты исследований методов и средств, их реализации опубликованы, но разбросаны в трудах международных и российских конференций, в статьях журналов, издаваемых в России и за рубежом, в описаниях патентов на изобретения. Поэтому представляется вполне назревшей и очевидной необходимость в систематизированном и обобщающем изложении как опубликованных, так и новых материалов той же тематики, полученных за последнее время.

В разделе 1 предлагаемой вниманию читателей новой монографии приведено описание методов измерения и обработки информации о РЗ в компрессоре ГТД, полученной с ОВТД, а также о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток, благодаря применению кластера из двух ОВТД. При этом обработка информации в цифровом виде обеспечивает самокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД по каждой лопатке за один период и усреднение информативных значений кодов на нескольких периодах вращения РК для уменьшения случайной составляющей погрешности. Кроме того, приведено описание метода обнаружения опасных деформаций лопаток.

В разделе 2 рассматриваются результаты исследований функций преобразования (ФП) ОВТД и ИЦ, полученные путем моделирования ЭМВ ЧЭ ОВТД с торцами лопаток и экспериментально, а также на основе результатов анализа ИЦ с учетом операций, предусмотренных методами, обеспечивающими самокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД.

Описание принципов построения систем на уровне структурно-функциональных схем (СФС) и алгоритмов их функционирования приведено в разделе 3. Особенность СФС – наличие МК, реализующих в реальном времени алгоритмы, разработанные на основе методов, в которых предусмотрено выполнение операций, связанных с самокомпенсацией, усреднением информативных значений кодов и обнаружением опасных деформаций лопаток. Кроме того, приведено описание алгоритма вычисления физических значений РЗ, выполняемого в ПЭВМ в составе систем, предусматривающего коррекцию температурных воздействий на контролируемые и соседние

лопатки по данным о текущих значениях температуры в проточной части компрессора.

В разделе 4 рассматриваются результаты исследований влияния ряда МФ на выходные коды МК, полученные после самокомпенсации температурных воздействий на ОВТД. Даны количественные оценки функций влияния (ФВ) соседних лопаток, температуры контролируемой и соседних лопаток, и осевых смещений РК в зависимости от изменений РЗ (y), которые характеризуют возможные погрешности.

В разделе 5 исследуются погрешности, связанные с «недокомпенсацией» температурных воздействий на ОВТД и дискретизацией напряжений на выходе ИЦ. С помощью моделирования ЭМВ ЧЭ ОВТД с торцом лопатки даны количественные оценки погрешностей «недокомпенсации» температурных воздействий на ОВТД и приведено описание способа их устранения, а также оценки максимально возможной и случайной погрешностей дискретизации при заданных значениях частоты импульсного питания ИЦ и скорости вращения РК.

В разделе 6 приведено описание технических и программных средств действующего макета, в которых реализованы принципы построения системы на основе методов измерения и обработки информации о РЗ в компрессоре ГТД. Рассматриваются результаты экспериментальных исследований метрологических показателей – систематической и случайной погрешности. С помощью имитации объекта (РК реального компрессора с электроприводом) в процессе вращения колеса осуществляется проверка работоспособности технических и программных средств и эффективности усреднения информативных кодов для уменьшения случайной погрешности на нескольких периодах вращения РК.

РАЗДЕЛ 1

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРАХ

Метод измерения РЗ в процессе вращения РК рассматривается в настоящем разделе скорее как идея самокомпенсации температурных воздействий на ОВТД, которая предусматривает фиксацию экстремальных значений информативного параметра ОВТД в моменты прохождения торцами лопаток и межлопаточными промежутками ЧЭ ОВТД с последующим вычислением разности экстремумов информативного параметра (индуктивности первичной обмотки СТ). Однако идея самокомпенсации обретает работоспособность только в совокупном применении ИЦ с включенными в нее ОВТД на входе и АЦП на выходе, вычислительного устройства - МК, оснащенного средствами ввода-вывода аналоговой и дискретной информации, а также методов обработки цифровых данных в реальном времени, результаты которых ориентированы на использование в системах управления и диагностики ГТД.

Приведено описание методов обработки, обеспечивающих реализацию идеи самокомпенсации температурных воздействий на ОВТД и получение искомым данных о РЗ по каждой лопатке и на каждом периоде вращения РК. Кроме того, рассматриваются методы обнаружения нештатных деформаций лопаток и, в частности, деформаций, свидетельствующих о начале предпомпажных состояний.

В заключение раздела приводится описание кластерного метода измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, отличающегося от существующих [3] самокомпенсацией температурных воздействий на каждый ОВТД в составе кластера, и рассматривается пример использования

этого метода в компрессоре ГТД для измерения РЗ на каждом из РК, расположенных на одном валу с учетом его осевых смещений (метод обеспечивает предельно возможную минимизацию числа ОВТД и соответствующую минимизацию числа установочных отверстий).

1.1. Идея самокомпенсации температурных воздействий на ОВТД в методе измерения радиальных зазоров

Рассматриваемый метод может быть использован как в компрессорах, так и турбинах, но описание метода ведется на примере РК компрессора, поскольку суть метода остается без изменений при замене компрессора на турбину [4, 5, 6].

На рис. 1.1 изображены два положения РК компрессора (I и II) с лопатками 1, 2, ..., n_d . Там же показана система отсчета $OXYZ$. Начало отсчета (точка O) находится на внутренней поверхности статора и в положении I начало отсчета совпадает с геометрическими центрами лопатки 1 и ЧЭ ОВТД. Ось X совпадает с направлением оси РК, ось Y – с направлением его радиуса, а ось Z – с направлением вращения РК (величина РЗ определяется координатой y).

Если предположить, что вращение РК происходит в нормальных температурных условиях, то при отсутствии влияния соседних лопаток (1 и 2) эквивалентная индуктивность ЧЭ, а, следовательно, эквивалентная индуктивность первичной обмотки СТ будут иметь максимально возможное значение (L_0) при совпадении центра ЧЭ (точки 0) и центра межлопаточного промежутка. Вместе с тем, при совпадении центра ЧЭ (и точки 0) с центром лопатки (положение I) согласно [1-3] индуктивность уменьшается и становится равной $L_0 - \Delta L_y$, где ΔL_y - изменение эквивалентной индуктивности, связанное с изменением координаты y (РЗ).

При воздействии температуры на элементы конструкции ОВТД (и датчик в целом), как показали результаты исследований, приведенных в [3], эквивалентная индуктивность СТ возрастает на величину ΔL_0 независимо от положения лопатки относительно ЧЭ ОВТД (эти данные подтверждают результаты исследования, приведенные в разделе 2 для группы ОВТД одного типоразмера).

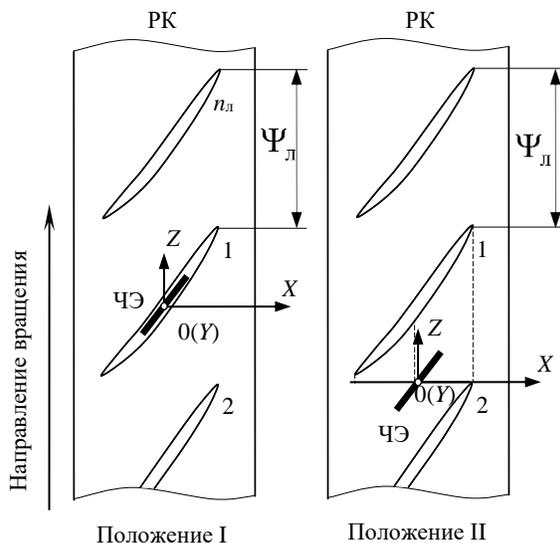


Рис. 1.1. Размещение ЧЭ ОВТД и системы отсчета $OXYZ$

В итоге для первого (I) из двух (I и II) рассмотренных положений РК относительно ЧЭ ОВТД (когда торец контролируемой лопатки находится в зоне чувствительности датчика) эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ можно представить в виде

$$L_{СТ(I)}^{ext} = L_0 + \Delta L_0 - \Delta L_y. \quad (1.1)$$

Для второго положения (II) (когда в зоне чувствительности датчика торец контролируемой лопатки отсутствует) выражение (1.1) примет вид:

$$L_{СТ(II)}^{ext} = L_0 + \Delta L_0, \quad (1.2)$$

где $L_{СТ(I)}^{ext}$ и $L_{СТ(II)}^{ext}$ - экстремальные значения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ.

Предлагаемый метод измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД предусматривает фиксацию $L_{СТ}^{ext}$ в положениях РК I, РК II и получение разности

$$\Delta L_{\text{СТ}}^{\text{ext}} = L_{\text{СТ(II)}}^{\text{ext}} - L_{\text{СТ(I)}}^{\text{ext}} = \Delta L_y, \quad (1.3)$$

которая не зависит от температурных воздействий на ОВТД (ΔL_θ) и определяется только искомыми изменениями индуктивности первичной обмотки СТ ΔL_y , связанными с РЗ (y).

Полагая, что РК находится в процессе равномерного вращения, эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ можно представить в виде функции времени $L_{\text{СТ}}(t)$ или координаты z - $L_{\text{СТ}}(z)$.

Тогда, в соответствии с предложенным методом, положениям I и II РК относительно ЧЭ ОВТД (рис. 1.1), действительно, соответствуют экстремальные значения $L_{\text{СТ}}^{\text{ext}}$. Они минимальные, когда в зоне чувствительности находится контролируемая лопатка, и максимальные в межлопаточном промежутке (рис. 1.2, эпюра 1). Характер изменений функций $L_{\text{СТ}}(t)$ ($L_{\text{СТ}}(z)$) сохраняется неизменным как при нормальной ($\theta_{\text{норм}}$), так и номинальной ($\theta_{\text{ном}}$) температурах (в проточной части компрессора разность $\theta_{\text{ном}}$ и $\theta_{\text{норм}}$ составляет около 600 °С). На том же рисунке представлены результаты преобразования, полученные в соответствии с выражением (1.3) - экстремальное (максимальное) значение разности $\Delta L_{\text{СТ}}^{\text{ext}}$.

Как уже отмечалось, изменения эквивалентной индуктивности, связанные с температурными воздействиями непосредственно на ОВТД (ΔL_θ), могут быть намного больше, чем изменения эквивалентной индуктивности от искомого РЗ (координаты y (ΔL_y)), причем в наибольшей степени это проявляется в турбине по сравнению с компрессором, где температура в проточной части отличается почти вдвое [3]².

Завершая описание метода измерения РЗ, следует отметить, что в последующих разделах (1.2, 1.3) рассматриваются методы, обеспечивающие обработку кодов, полученных в ИЦ с ОВТД на входе и АЦП на выходе. Однако подробное описание ИЦ (ее схемотехнических решений и результатов анализа) приведено лишь в разделе 2, но для изложения методов обработки в настоящем разделе вполне достаточно виртуального представления ИЦ, код C на выходе которой изменяется во времени t (или по z -координате) аналогично изменениям информативного параметра $L_{\text{СТ}}$ ОВТД (рис. 1.3 и 1.2).

² Следует иметь в виду, что в приведенном здесь анализе предложенного метода не были учтены температурные воздействия как на контролируемую, так и на соседние лопатки. Результаты таких исследований приведены в разделе 4, посвященном влиянию МФ.

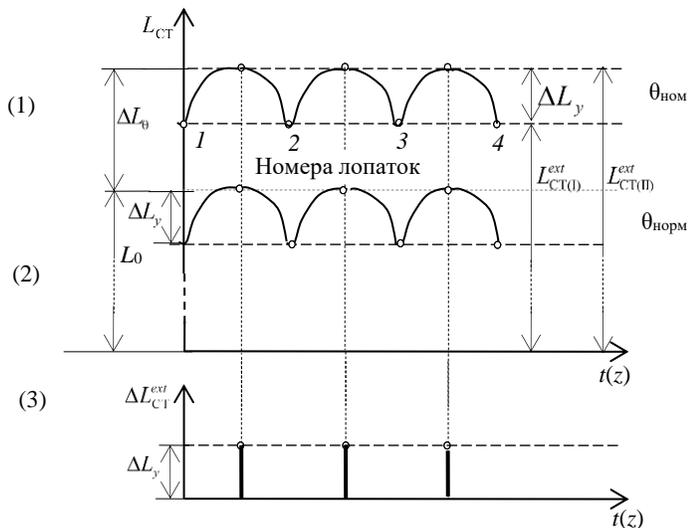


Рис. 1.2. Функции $L_{CT}(t)$ ($L_{CT}(z)$) при номинальной ($\theta_{ном}$, эпюра 1) и нормальной ($\theta_{норм}$, эпюра 2) температурах, а также разности их экстремальных значений (эпюра 3)

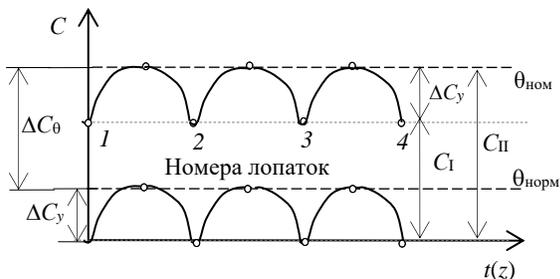


Рис. 1.3. Составляющие кодов на выходе ИЦ (ΔC_θ и ΔC_γ), соответствующие изменениям информативного параметра ОВД, связанные с температурой (ΔL_θ) и P3 (ΔL_γ)

При этом изменениям информативного параметра ОВТД L_{CT} во времени t (по координате z) соответствует изменения кода C на выходе ИЦ (АЦП), экстремальным значениям $L_{CT(I)}^{ext}$ и $L_{CT(II)}^{ext}$ - экстремальные значения кодов C_I и C_{II} , а составляющим ΔL_y и ΔL_θ – составляющие ΔC_y и ΔC_θ , связанные с изменениями РЗ (y) и температуры (θ) (соответственно). Вместе с тем, согласно данным, полученным в [3] изменения (ΔL_θ) в компрессоре вдвое превышает изменение ΔL_y (в диапазоне РЗ от 0,5 до 1,5 мм) и более, чем втрое в турбине. То же соотношение сохраняется и в ИЦ между составляющими кода ΔC_y и ΔC_θ . Иначе говоря, ресурс АЦП неравномерно распределяется между составляющими кода ΔC_y и ΔC_θ причем в пользу МФ – температуры θ . Уменьшение доли составляющей кода ΔC_y означает увеличение относительной приведенной погрешности и, в частности, ее случайной составляющей, связанной, например, с неустраняемыми помехами в ИЦ.

Поэтому в разделе 1.2 рассматриваются не только методы обработки, обеспечивающие самокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД, но и уменьшение случайных составляющих погрешностей. Кроме того, эти методы, равно как методы, рассматриваемые в разделе 1.3, работая в реальном времени, должны обладать быстроедействием, обеспечивающим необходимую информацию по каждой лопатке за один или несколько периодов вращения РК во всем диапазоне изменений скорости его вращения.

1.2. Методы обработки, обеспечивающие самокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД

С учетом требований, сформулированным в разделе 1.1, были разработаны два метода обработки измерительной информации. Первый предусматривает определение усредненного экстремального значения кода межлопаточных промежутков. Второй метод, объединяя несколько операций, назван по имени последней как метод определения экстремальных значений разностных кодов по каждой лопатке за один период вращения РК. При этом в описании метода отмечается возможность усреднения экстремальных значений разностных кодов на нескольких периодах вращения РК для уменьшения случайных составляющих погрешности.

1.2.1 Метод определения усредненного значения кода в межлопаточных промежутках

Согласно разделу 1.1 самокомпенсация температурных воздействий на ОБТД предусматривает определение экстремальных значений информативного параметра $L_{\text{СТ(II)}}^{\text{ext}}$, а, следовательно, кодов ИЦ (C_{II}) в каждом промежутке между контролируемой и одной из соседних лопаток. С высокой степенью вероятности, можно утверждать, что температурное поле достаточно равномерно распределено по объему лопаточного венца, а значит можно отказаться от определения экстремума в каждом межлопаточном промежутке и воспользоваться единым усредненным значением (\bar{C}_{II}), полученным за один или несколько периодов вращения РК [7, 8].

Очевидным преимуществом такого подхода является снижение влияния помех в ИЦ на результат преобразования. При этом среднее значение кода \bar{C}_{II} в межлопаточных промежутках можно рассматривать как оценку математического ожидания и вычислять различными методами. Один из них, наиболее очевидный, предусматривает усреднение экстремумов кодов по всем межлопаточным промежуткам РК.

Однако более предпочтительным представляется применение метода определения \bar{C}_{II} , основанного на построении статистического распределения цифровых кодов (гистограммы) с объемом измерительной выборки не менее чем за полный период вращения РК. При этом не требуется выполнение поиска локальных экстремумов, и в расчетах для усреднения доступно множество отсчетов кода каждого межлопаточного промежутка (при наличии случайных помех), что делает оценку \bar{C}_{II} более эффективной [9].

Статистическое распределение цифровых кодов осуществляется в рабочем режиме функционирования объекта (обычно достаточно одного периода вращения РК). При этом формируется массив $g[C]$, где символ «C» соответствует величине зарегистрированного кода, а значением элемента массива $g[C]$ является частота его появления в выборке. Очевидно, что размер массива $g[C]$ равен диапазону выходных кодов АЦП и при использовании 10-ти разрядного АЦП содержит 2^{10} элементов $g[0] \dots g[1023]$.

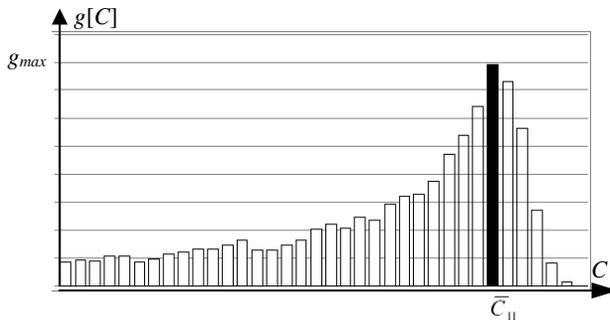


Рис. 1.4. Выделение на гистограмме единого усредненного кода межлопаточных промежутков (\bar{C}_{II})

Рассматриваемый метод предусматривает использование в качестве искомого экстремума единого усредненного значения кода \bar{C}_{II} , которое соответствует глобальному экстремуму гистограммы. На рис. 1.4 показана зона глобального экстремума гистограммы с разбивкой на отдельные разряды. Выделен глобальный экстремум величиной g_{max} , который локализован в разряде \bar{C}_{II} . Основная операция предельно проста и сводится к фиксации экстремума

$$g(\bar{C}_{II}) = \max_{C=1, \dots, C_{max}} g(C).$$

Нахождение экстремума гистограммы может происходить непосредственно в процессе ее накопления и хорошо сочетается с реальным временем. При этом не требуется каких-либо исходных данных и результирующих вычислений на выходе. Получаемая оценка, представляющая собой наиболее часто встречающийся код, является смещенной. Однако смещение может быть скорректировано дальнейшей обработкой экстремальных разностных кодов.

1.2.2 Метод определения экстремальных значений разностных кодов по каждой лопатке за один период вращения РК

В разделе 1.1 отмечалось, что самокомпенсация температурных воздействий на ОВТД осуществляется путем определения экстремальных значений

информативного параметра ОВТД и соответствующих кодов АЦП (ИЦ) в моменты прохождения ЧЭ центрами межлопаточных промежутков и контролируемые лопатками, а затем вычисление их разности.

Однако в предлагаемом здесь методе предусмотрено определение усредненного экстремального значения кодов межлопаточных промежутков \bar{C}_{II} на предыдущем периоде вращения РК, а на текущем периоде – совмещенное выполнение нескольких операций с целью минимизации временных затрат.

В число таких операций входят определения

- разности усредненного (на предыдущем периоде вращения РК) значения кодов межлопаточных промежутков \bar{C}_{II} и текущих значений кодов (C) с выхода АЦП (ИЦ) ($\Delta C = \bar{C}_{II} - C$);
- экстремальных значений найденной разности кодов (ΔC^{ex}) простым перебором;
- усредненного экстремального значения кодов межлопаточных промежутков \bar{C}_{II} , предназначенного для использования на следующем периоде вращения РК.

Все перечисленные операции, предусмотренные предлагаемым методом, производятся в реальном времени МК в составе системы (принципы построения систем (структурно-функциональные схема и алгоритмы) рассматриваются в разделе 3).

На рис. 1.5 представлены временные диаграммы, которые поясняют предусмотренные методом операции.

Во-первых, это определение разности $\Delta C = \bar{C}_{II} - C$, где \bar{C}_{II} (усредненный код межлопаточных промежутков, найденный на предыдущем периоде вращения РК) – величина постоянная, представленная прямой линией, параллельной оси времени t (a). Огибающая кодов $C(t)$ на выходе АЦП (ИЦ) соответствует той, что представлена на рис. 1.3 при номинальной температуре ($\theta_{ном}$).

Фрагмент огибающей функции $C(t)$ в увеличенном масштабе представлен на «аппликации» в виде пунктирной линии, проходящей через две точки (два отсчета кода C), интервал времени между которыми определяет шаг

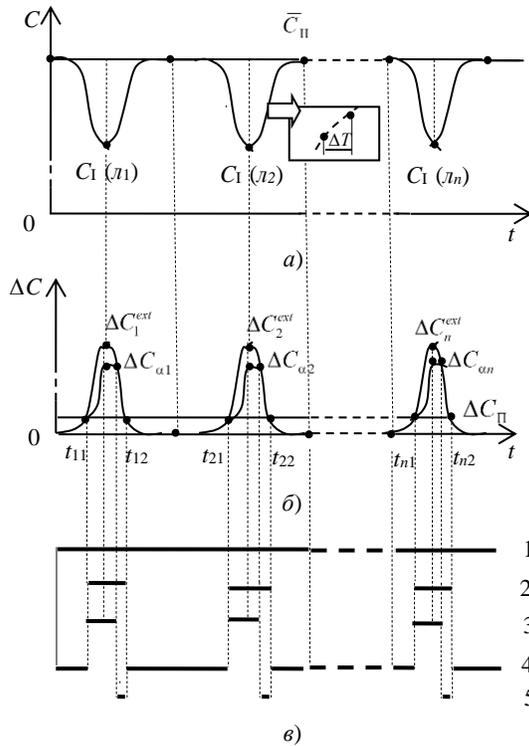


Рис. 1.5. Временные диаграммы – код \bar{C}_{11} , найденный на предыдущем периоде вращения РК (а), разность кодов $\Delta C(t)$ (б), диаграммы длительности операций, совмещенных на текущем периоде вращения РК (в)

дискретизации ΔT . В пределах ΔT осуществляется вычисление разности кодов ΔC . И это повторяется многократно (по числу лопаток n) на протяжении полного периода вращения РК (T). Несмотря на дискретный характер операций вычисления ΔC на каждом шаге ΔT , длительность этой операции на диаграмме (рис. 1.5, в, 1) представлена сплошной линией на протяжении полного периода вращения РК.

Как следует из рис.1.5, б экстремальные значения ΔC_1^{ext} , ΔC_2^{ext} , ..., ΔC_n^{ext} находятся между нулевыми значениями разности. Однако их поиск

предлагается вести в интервале времени, ограниченным некоторым пороговым значением разности кодов ΔC_{II} . На диаграмме рис. 1.5, б временные интервалы, соответствующие порогу ΔC_{II} , обозначены как $t_{11} \div t_{12}$, $t_{21} \div t_{22}$, ..., $t_{n1} \div t_{n2}$ для лопаток под номерами 1, 2, ..., n. При этом величина порога ΔC_{II} выбирается с учетом двух условий. Согласно первому интервалы времени $0 \div t_{11}$, $t_{12} \div t_{21}$, ..., $t_{n2} \div 0$ должны быть достаточны для получения достоверных значений усредненного кода \bar{C}_{II} , предназначенного для использования на следующем периоде вращения РК. Согласно второму условию пороговое значение ΔC_{II} должно быть больше максимально возможного уровня неустранимых помех в ИЦ (обычно ΔC_{II} составляет $(0,03 \div 0,05) \Delta C_{max}^{ext}$, где ΔC_{max}^{ext} - максимально возможное значение ΔC^{ext}).

Вместе с тем необходимо отметить, что поиск экстремальных значений разности ΔC_1^{ext} , ΔC_2^{ext} , ..., ΔC_n^{ext} (осуществляемый простым перебором) производится быстрее отведенных для него интервалах времени. Это происходит благодаря непрерывному вычислению произведения $\Delta C \cdot \alpha$ - возрастающей разности кодов ΔC (по всем лопаткам) на коэффициент α (адаптивный порог), причем величина α выбирается равной $0,5 \div 0,8$. Полученный результат фиксируется при достижении экстремума ΔC^{ext} , а затем в моменты равенства $\Delta C = \Delta C_\alpha$, где $\Delta C_\alpha = \alpha \cdot \Delta C$, процесс перебора кодов останавливается и фиксируются соответствующие отсчеты времени $t_{\alpha 1}$, $t_{\alpha 2}$, ..., $t_{\alpha n}$, что свидетельствует о завершении операции поиска экстремальных значений ΔC_1^{ext} , ΔC_2^{ext} , ..., ΔC_n^{ext} (диаграмма временных интервалов, рис. 1.5, в, 3) и доступности зафиксированной информации для обработки³.

И, наконец, последняя из числа предусмотренных методом операция предполагает определение усредненного значения кодов \bar{C}_{II} в межлопаточных промежутках на текущем периоде вращения РК для использования на последующем периоде. В отличие от аналогичной операции, выполняемой на первом по порядку периоде вращения РК, где построение гистограммы

³ Обработка моментов времени t_α рассмотрена в разделе 1.3.

осуществлялось на полном периоде его вращения (рис. 1.4), определение \bar{C}_{II} на текущем периоде происходит в интервалах времени $0 \div t_{11}, t_{12} \div t_{21}, \dots, t_{n2} \div 0$, т.е. в окрестностях центров межлопаточных промежутков (рис. 1.5, в, 4). Однако, несмотря на указанные отличительные особенности, количественные оценки наиболее вероятного усредненного значения кодов \bar{C}_{II} практически одинаковы, а их гистограмма идентична фрагменту гистограммы на рис. 1.4 в окрестности \bar{C}_{II} .

Завершая описание метода определения экстремальных значений разности кодов по всем (n) лопаткам, необходимо подчеркнуть, что обновление искомым значений ΔC^{ext} по каждой лопатке происходит через временной интервал, равный периоду вращения РК. При этом после фиксации экстремальных значений кодов по каждой лопатке ($\Delta C_1^{ext}, \Delta C_2^{ext}, \dots, \Delta C_n^{ext}$) резервируются интервалы времени для обнаружения опасных деформаций по каждой из n_l лопаток, которые показаны на рис. 1.5 в, 5. Те же интервалы времени по необходимости используются для уменьшения случайных погрешностей в определении экстремальных значений разностных кодов, что обеспечивается их усреднением по каждой лопатке на нескольких периодах вращения РК. Согласно [10] усреднение на N периодах снижает погрешности примерно в \sqrt{N} раз. Подробнее случайные погрешности и причины их появления рассматриваются в разделах 5 и 6, причем в разделе 6 приведены результаты экспериментальных исследований эффективности снижения случайных погрешностей путем усреднения разностных кодов на нескольких периодах вращения РК.

1.3. Методы обнаружения опасных деформаций лопаток

В рабочих режимах компрессора или турбины ГТД при номинальных температуре и скорости вращения РК происходят температурные и упругие деформации лопаток, которые незначительно отличаются друг от друга и от усредненного значения деформации по всем лопаткам.

Однако в процессе эксплуатации ГТД изменяются упругие свойства металла, которые проявляются в изменениях величины деформаций отдельных экземпляров лопаток, что приводит к смещению во времени огибающей

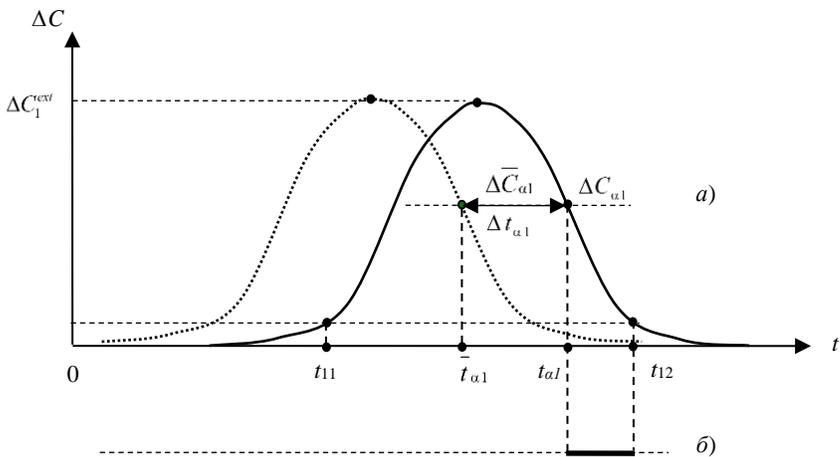


Рис. 1.6. Временная диаграмма проявления смещения торца лопатки номер 1 (а) и длительность операций обнаружения опасного состояния (б)

разностных кодов $\Delta C(t)$. Если предположить, что такая деформация проявилась у лопатки под номером 1 (рис. 1.6, а, сплошная линия), то все отсчеты $\Delta C(t)$, включая $\Delta C_{\alpha 1} = \alpha \cdot \Delta C_1^{ext}$, окажутся смещенными во времени вправо по оси t . Причем коду $\Delta C_{\alpha 1}$ соответствует начало интервала времени $t_{\alpha 1} \div t_{12}$, предназначенного для обнаружения опасных состояний (рис. 1.6, б). В качестве начала отсчета смещения во времени огибающей разностных кодов принимается усредненное за несколько периодов вращения РК значение $\bar{t}_{\alpha 1}$ текущих отсчетов $t_{\alpha 1}$ (рис. 1.6, а, штриховая линия), что позволяет количественно оценить смещение во времени $\Delta t_{\alpha 1} = t_{\alpha 1} - \bar{t}_{\alpha 1}$. Момент времени начала каждого текущего периода формируется по синхросигналам датчика частоты вращения (ДЧВ). Для получения отсчетов реального времени используется модуль таймера МК.

Как отмечалось в разделе 1.2.2, величина коэффициента α составляет $0,5 \div 0,8$. Вместе с тем, экспериментальные исследования показали, что при $\alpha=0,6$ ($\Delta C_{\alpha 1} = 0,6 \cdot \Delta C_1^{ext}$) и в момент времени $t_{\alpha 1}$, производная $\frac{d(\Delta C)}{dt}$

достигает максимума (т.е. $t_{\alpha 1}$ является точкой перегиба функции $\Delta C(t)$), а потому именно этот момент времени ($t_{\alpha 1}$) является наиболее чувствительным для обнаружения нештатных деформаций лопаток.

Измеренный временной интервал смещения торца лопатки ($\pm \Delta t_{\alpha}$), представленный в относительном виде на периоде вращения РК $\left(\pm \delta t = \frac{\Delta t_{\alpha}}{T_{\text{РК}}} \right)$, является исходной информацией для обнаружения опасных состояний, которые могут иметь место при появлении нештатной деформации лопатки, а также при возникновении колебаний лопаток, вызванных срывными процессами в газоздушном тракте, которые свидетельствуют о начале помпажных явлений [11-13]. При этом штатному режиму работы ГТД соответствует незначительная допустимая величина (ε_0) изменений δt для всех лопаток РК ($|\delta t| \leq \varepsilon_0$). При нарушении этого условия ($|\delta t| > \varepsilon_0$) для любой из лопаток возникает нештатная ситуация, которую в дальнейшем необходимо диагностировать. Величина допуска ε_0 определяется экспериментально на этапе испытаний ГТД.

На рис. 1.7 приведены примеры проявления указанных выше нештатных ситуаций. В частности деформация, которая характеризуется изменением величины δt одного знака ($\delta t > 0$) на рис. 1.7, а показана для лопатки номер 5.

Колебательный процесс лопаток (номер 2, 3, 5, 6) характеризуется наличием изменений величины δt разных знаков ($+\delta t$ и $-\delta t$) с чередованием в течение текущего периода вращения (рис. 1.7, б).

Таким образом, в интервале, предназначенном для обнаружения опасных состояний (рис. 1.6, б), для каждой лопатки РК выполняется следующая последовательность операций:

- получение отсчета времени t_{α} , соответствующего коду ΔC_{α} на текущем периоде вращения РК;
- вычисление временного интервала смещения огибающей разностного кода $\Delta t_{\alpha} = t_{\alpha} - \bar{t}_{\alpha}$, где \bar{t}_{α} – усредненное на нескольких предшествующих периодах вращения РК время t_{α} ;

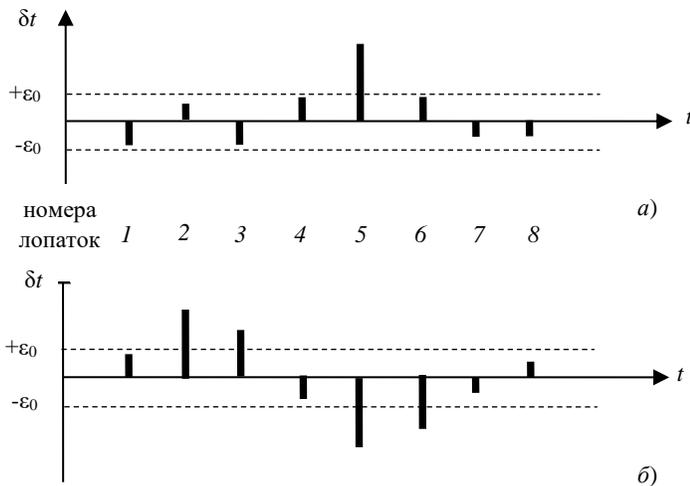


Рис. 1.7. Проявление нештатной деформации лопатки номер 5 (а) и колебательного процесса нескольких (номер 2, 3, 5, б) лопаток (б)

- представление временного интервала в относительном виде

$$\delta t = \frac{\Delta t_\alpha}{T_{\text{РК}}}, \text{ где } T_{\text{РК}} - \text{период вращения РК (соответствующий максимальной скорости);}$$

- проверка условия появления нештатной деформации $|\delta t| \leq \epsilon_0$;
- при $|\delta t| > \epsilon_0$ выдается сигнал на верхний уровень системы управления ГТД для идентификации и принятия решения;
- вычисление усредненного значения времени \bar{t}_α для использования в следующем цикле перечисленных операций.

1.4. Кластерный метод измерения и обработки информации о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток

Наиболее близкие из известных кластерных методов представлены в работе [3]. В методах предусмотрено применение распределенного кластера из двух ОВТД, ориентированных на использование в турбинах. В

направлении оси РК (оси X системы отсчета $OXYZ$) ЧЭ ОВТД в составе кластера находятся на небольшом расстоянии друг от друга (не более 2 мм), а в направлении вращения РК (ось Z) – на расстоянии $1,5\Delta z_{ш}$, где $z_{ш}$ – шаг установки лопаток. Положения ЧЭ (ЧЭ₁ и ЧЭ₂ в направлении оси X) обеспечивают получение семейства ФП в виде зависимостей $L_{СТ1}^{ex}(x, y)$ и $L_{СТ2}^{ex}(x, y)$, необходимых для формирования системы из двух независимых уравнений, обеспечивающих вычисления искомых радиальных и осевых смещений (координат y и x). Размещение же ЧЭ₁ и ЧЭ₂ на расстоянии $1,5z_{ш}$ друг от друга обеспечивает термокомпенсацию, поскольку в процессе вращения РК ЧЭ₁ и ЧЭ₂ поочередно выполняют рабочие и компенсационные функции. Серьезным недостатком методов (и это отмечалось ранее) является неполная компенсация температурных воздействий на элементы конструкции ОВТД (ЧЭ, ТВ, ОВ СТ) и датчик в целом, что связано с трудностями подбора пары идентичных по своим параметрам ОВТД из-за несовершенства существующих технологий их изготовления.

Предлагаемый кластерный метод, призванный устранить этот недостаток, отличается размещением так называемых геометрических центров распределенного кластера (г.ц.кл.) в г.ц.л. при симметричном и ограниченном по величине смещении центров ЧЭ₁ и ЧЭ₂ в направлении оси РК (координатной оси X)⁴.

Кроме того, предполагается, что в соответствии с методами, рассмотренными в разделах 1.1 и 1.2, производится самокомпенсация температурных воздействий на ОВТД₁ и ОВТД₂ в составе кластера, причём все предусмотренные методами измерительные и вычислительные операции производятся параллельно и независимо друг от друга. Это означает, что ЧЭ₂ может быть смещен в направлении вращения РК (ось Z) на любое целое число углового шага $\Delta\psi_{ш}$ [14].

На рис. 1.8 представлено изображение РК в компрессоре с размещением ЧЭ₁ и ЧЭ₂ распределенного кластера ОВТД, причем нумерация лопаток

⁴ Термин «геометрические центры распределенного кластера» использовался в монографии [2] при систематизированном описании кластерных методов измерения координат смещений торцов лопаток и в журнальных публикациях.

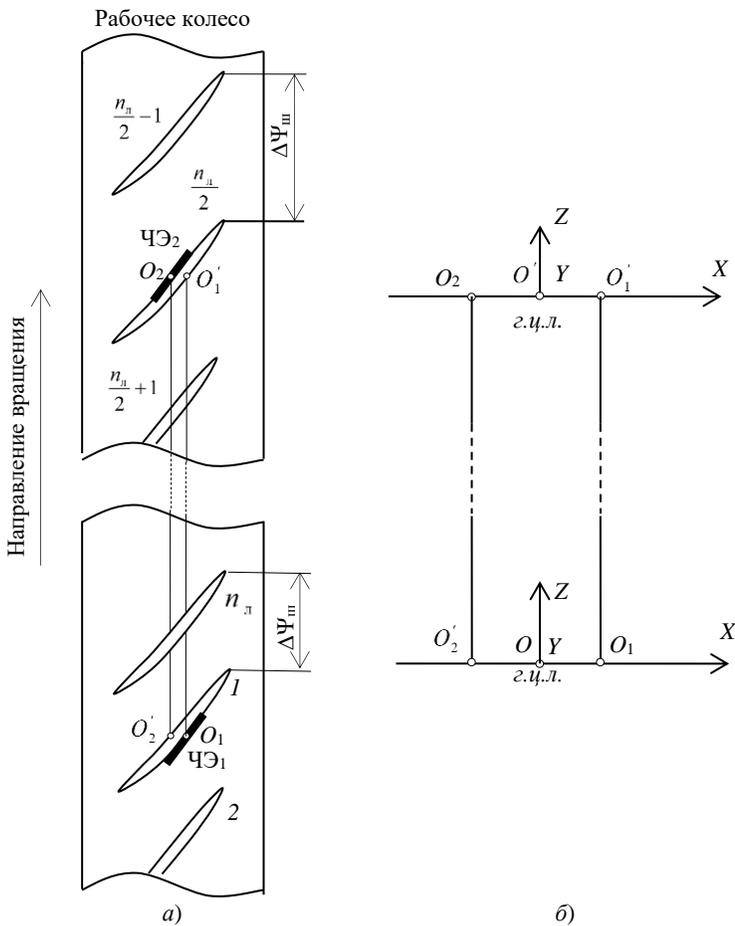


Рис. 1.8. Размещение ЧЭ_1 и ЧЭ_2 распределенного кластера ОБТД (а), а также систем отсчета $O'XVZ$ и $O'XVZ$ и г.ц.л., г.ц.кл. в увеличенном масштабе (б)

начинается с 1 и заканчивается n_n . Предполагается также, что с целью обнаружения биений РК по разности РЗ (для выбранного номера лопатки) ЧЭ_2 смещается в направлении вращения (оси Z системы отсчета) на угол $\left(\frac{n_n}{2} - 1\right) \cdot \Delta\psi_m$, где n_n - чётное число (например, 100).

На том же рис. 1.8 в увеличенном масштабе показано размещение центров ЧЭ₁ и ЧЭ₂ (точки O_1 и O_2), системы отсчета $OXYZ$ и $O'XYZ$, где точки O и O' - начала отсчета, которые совпадают с г.ц.л. под номерами l и $n_n/2$ (например, 50 при $n_n=100$). Кроме того, показаны точки O'_1 и O'_2 - проекции O_1 и O_2 на оси X , причем точки O и O' делят отрезки O'_2O_1 и $O_2O'_1$ соответственно на равные части. Следует также отметить, что упомянутые ранее г.ц.л. находятся в точках O и O' (совмещенных с г.ц.л. под номерами l и $n_n/2$, а также началами систем отсчета $OXYZ$ и $O'XYZ$).

В процессе вращения РК информативные параметры ОВТД₁ и ОВТД₂ преобразуются в соответствующие значения кодов на выходах индивидуальных ИЦ каждого из датчиков (ИЦ₁ и ИЦ₂). Далее в соответствии с методами обработки, обеспечивающей самокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД₁ и ОВТД₂ (раздел 1.2), определяются разностные значения кодов и их экстремальные значения (ΔC_1^{ext} и ΔC_2^{ext}). Эти операции выполняются независимо друг от друга в двух вычислительных устройствах – МК₁ и МК₂ (как и операции усреднения и обнаружения опасных деформаций лопаток).

Что же касается определения радиальных и осевых смещений торцов лопаток ($PZ(y)$ и $OC(x)$), то их физические значения можно найти, решая систему уравнений:

$$\begin{cases} \Delta C_1^{ext} = f_1(x, y) \\ \Delta C_2^{ext} = f_2(x, y) \end{cases}, \quad (1.4)$$

где $f_1(x, y)$ и $f_2(x, y)$ - это ФП МК₁ и МК₂, но, как правило, ГХ₁ и ГХ₂ (градуировочные характеристики), полученные экспериментально по методике, описание которой приведено в работе [3].

Предполагается, что решение системы уравнений производится в ПЭВМ, связанной с индивидуальными МК₁ и МК₂, а также с другими источниками информации о состоянии объекта (ГТД) для его управления.

Следует отметить, что ни числом ОВТД в составе кластера, ни числом соответствующих установочных отверстий рассмотренный метод не отличается от его аналогов [3]. Важное преимущество – это отсутствие

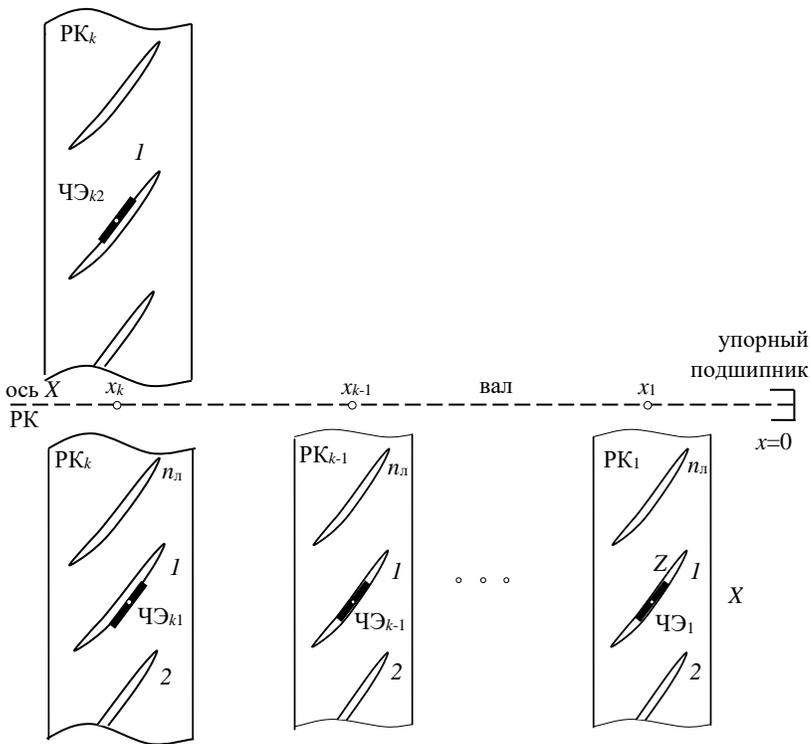


Рис. 1.9. Размещение ЧЭ кластера ОВТД на $PK_1, \dots, PK_{k-1}, PK_k$

необходимости в подборе идентичных пар ОВТД, от которых зависит качество компенсации температурных воздействий на ОВТД (кроме того, при необходимости метод обеспечивает измерение биений).

Однако эффективность метода существенно возрастает при необходимости измерения РЗ на нескольких РК, размещенных на одном валу при наличии ОС (x), связанных с термической деформацией этого вала.

Если предположить равномерный нагрев вала от упорного подшипника, где $x=0$, до конца вала (рис. 1.9), а число РК на валу равным k и деформация вала в месте размещения PK_k составляет x_k , то деформация в месте

размещения РК₁ составит $x_1 = \frac{x_k}{k} = \Delta x$, а в месте размещения РК_{k-1} $x_{k-1} = (k-1)\Delta x$.

Тогда для решения задачи измерения РЗ достаточно кластера из $k+1$ ОВТД, который включает кластер из двух ОВТД на РК_k (на остальные $k-1$ РК размещены по одному ОВТД).

Информативные параметры ОВТД₁, ОВТД₂, ..., ОВТД_{k-1} после преобразования в ИЦ₁, ИЦ₂, ..., ИЦ_{k-1}, а также определения экстремальных значений разностных кодов (эти операции выполняются в соответствии с методами, обеспечивающими самокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД) можно записать семейством ФП (ГХ):

$$\begin{cases} \Delta C_1^{ext} = f_1(x, y); \\ \Delta C_2^{ext} = f_2(x, y); \\ \dots \\ \Delta C_{k-1}^{ext} = f_{k-1}(x_{k-1}, y_{k-1}). \end{cases} \quad (1.5)$$

Семейство ФП (ГХ) кластера ОВТД_{k1} и ОВТД_{k2} после подобных преобразований и обработки можно записать в виде системы уравнений аналогичной (1.4):

$$\begin{cases} \Delta C_{k1}^{ext} = f_{k1}(x_k, y_k) \\ \Delta C_{k2}^{ext} = f_{k2}(x_k, y_k) \end{cases}, \quad (1.6)$$

В результате решения системы уравнений (1.6) определяются x_k, y_k . По найденному x_k определяется Δx и далее, в соответствии с принятой моделью равномерного нагрева вала – его локальные деформации x_1, x_2, \dots, x_{k-1} , а затем из уравнений (1.5) вычисляются искомые РЗ - y_1, y_2, \dots, y_{k-1} .

Вместе с тем, необходимо особо отметить, что в реальных условиях происходит неравномерный нагрев вала с размещенным на нем набором РК. В этой связи необходима более достоверная модель термической деформации. При этом результаты моделирования (x_1, x_2, \dots, x_{k-1}), которые подставляются в выражения (1.5), могут корректироваться с учетом температуры,

измеренной встроенными в ОВТД₁, ОВТД₂, ..., ОВТД_{k-1} термопарами [1-3], что в конечном счете повышает точность вычисления РЗ (y_1, y_2, \dots, y_{k-1}).

Необходимо также подчеркнуть, что все операции, связанные с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД₁, ОВТД₂, ОВТД₃, ..., ОВТД_{k-1}, ОВТД_{k1}, ОВТД_{k2}, усреднением и обнаружением опасных состояний лопаток РК₁, РК₂, ..., РК_k (в соответствии с методами, изложенными в разделах 1.2 и 1.3), выполняются в индивидуальных вычислительных устройствах (МК). Вычислительные операции (решение системы уравнений (1.6) при определении РЗ и ОС РК_k, а также моделирование x_1, x_2, \dots, x_{k-1} и расчеты y_1, y_2, \dots, y_{k-1} согласно (1.5)) выполняются на ПЭВМ, соединенной с индивидуальными МК линиями связи.

Заключение к разделу 1

Предложен метод измерения РЗ между статорной оболочкой и торцами лопаток компрессора ГТД с помощью ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника. Предложенный метод отличается от существующих самокомпенсацией температурных воздействий на элементы конструкции и датчик в целом. При этом идея самокомпенсации предусматривает фиксацию в процессе вращения РК экстремальных значений информативного параметра ОВТД (эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ) при наличии контролируемой лопатки и межлопаточного промежутка в зоне чувствительности ЧЭ, а затем вычисления разности полученных результатов, которая не зависит от температурных воздействий. Благодаря самокомпенсации, отпадает необходимость в дополнительном ОВТД для термокоррекции и дополнительном установочном отверстии в статорной оболочке, что определяет преимущества предлагаемого метода по сравнению с известными.

Показано, что идея самокомпенсации работоспособна только при использовании ИЦ с включенным в нее ОВТД на входе и АЦП на выходе, а также вновь разработанных двух методов обработки в реальном времени цифровых данных, полученных в ИЦ. Согласно первому методу, определяется усредненное экстремальное значение кода по всем межлопаточным промежуткам за полный, причем первый, период вращения РК. Метод предусматривает построение статистического распределения (гистограммы) кодов ИЦ и фиксацию найденного по гистограмме наиболее вероятного

значения кода для использования его на следующем периоде вращения РК. При этом предложенный метод гарантирует уменьшение случайной составляющей погрешности, связанной с неустранимыми помехами в ИЦ. Второй метод предусматривает совмещение нескольких операций на одном периоде вращения РК, включая вычисление разности усредненного экстремального значения кода межлопаточных промежутков, найденного на предыдущем периоде вращения РК, и кодов ИЦ, получаемых на текущем периоде, определения экстремальных значений разности кодов простым перебором по всем лопаткам, а также усредненного экстремального значения кода межлопаточных промежутков для его использования на следующем периоде вращения РК. Кроме того, предусмотрено усреднение экстремальных значений разностных кодов по каждой лопатке на нескольких периодах вращения РК для уменьшения случайных составляющих погрешностей.

Предлагаемый метод обнаружения опасных деформаций каждой из лопаток базируется на факте смещения во времени огибающей разностных кодов $\Delta C(t)$, а фактически одной точки перегиба этой функции, которой соответствует разностный код ΔC_0 , равный $0,6 \cdot \Delta C^{ext}$. Метод предусматривает совокупность последовательных операций, в т.ч. фиксацию момента времени, соответствующего разностному коду ΔC_0 , вычисление временного интервала смещения относительно аналогичного момента времени, усредненного на предыдущих периодах вращения РК (при отсутствии искомых деформаций), представление интервала времени в относительном виде, проверку условия обнаружения нештатной деформации, а при ее наличии выдачу сигнала на верхний уровень системы управления ГТД для идентификации и принятия решения. Кроме того, приведены примеры нештатной деформации одной из лопаток, а также деформаций разного знака для группы лопаток, вызванных срывными явлениями в газозвоздушном тракте, свидетельствующими о возможном предпомпажном состоянии ГТД.

Предложен кластерный метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток. Отличительная особенность метода – самокомпенсация температурных воздействий на каждый из двух ОВТД в составе кластера, которая осуществляется в реальном времени и независимо, благодаря применению индивидуальных ИЦ и МК (как и обнаружение опасных состояний, а также усреднение разностных кодов по каждой лопатке на нескольких

периодах вращения РК). Приведен пример использования предложенного метода для измерения РЗ на нескольких РК компрессора, размещенных на одном валу с упорным подшипником. При этом число ОВТД и число соответствующих установочных отверстий минимизировано и равно числу РК плюс один, что достигается моделированием локальных деформаций вала в местах размещения РК с использованием результатов измерений ОС максимально удаленного от упорного подшипника РК (с помощью кластера из двух ОВТД).

РАЗДЕЛ 2

ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОДНОВИТКОВОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ

Как было показано в разделе 1, цифровой обработке, осуществляемой вычислительными средствами системы, предшествуют аналоговые измерительные преобразования в ОВТД не только искомым РЗ (или в кластере ОВТД - радиальных и осевых смещений торцов лопаток), но и температурных воздействий в положении РК I и только температуры в положении РК II, а также последующие аналого-цифровые преобразования эквивалентной индуктивности СТ (соответствующие указанным положениям РК).

Известно также, что основными характеристиками измерительных преобразователей являются ФП, которые определяют связь входных и выходных параметров, причем особая значимость ФП проявляется на этапе проектирования систем измерения для количественной оценки их эффективности.

В настоящем разделе рассматриваются как ФП ОВТД, так и ФП ИЦ.

Предполагается, что измерение РЗ производится в компрессоре ГТД с использованием самокомпенсации температурных воздействий на ОВТД. Семейство ФП ОВТД определяется путем моделирования ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки с последующим пересчетом полученных значений эквивалентной индуктивности ЧЭ в эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ и интегрированием результатов пересчета с результатами экспериментальных исследований влияния температуры на эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ.

Приводятся результаты анализа ИЦ, которая отличается от известной ИЦ с приближенным дифференцированием размещением имитатора ОВТД

(ИОВТД) в дифференциальной схеме и выбранной величиной его индуктивности. Семейство ФП ОВТД и результаты анализа ИЦ используются для получения семейств ФП ИЦ [15-16].

Аналогичным образом определяются семейства ФП кластера ОВТД и соответствующих семейств ФП ИЦ (кластеры ОВТД и ИЦ ориентированы на применение в системах измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, в которых обеспечена самокомпенсация температурных воздействий на каждый ОВТД в составе кластера).

2.1. Семейства функций преобразования одновитковых вихретоковых датчиков

Как уже отмечалось, задача измерения РЗ решается в компрессоре ГТД, причем РК с лопатками ($1, 2, \dots, n_{л}$) было показано на рис. 1.1 в двух положениях относительно ЧЭ. В положении I центр ЧЭ совпадает не только с центром лопатки 1 , а и с точкой 0 (начало отсчета в системе $OXYZ$), которая находится на внутренней поверхности статора. Представляется очевидным, что искомую величину РЗ в такой системе отсчета определяет координата y . Тогда согласно разделу 1.1 эквивалентная индуктивность первичной обмотки СТ ($L_{СТ}$), зависящая от РЗ (y) и температуры (θ), в положении РК I будет иметь минимальное значение, а в положении РК II, когда центр ЧЭ совпадает с центром межлопаточного промежутка, напротив – максимальное значение, зависящее только от температуры θ . Это означает, что ФП ОВТД можно представить как семейство ФП, в котором индексы I и II соответствуют указанным положениям РК

$$\begin{cases} L_{СТ(I)}^{ext} = f_I(y, \theta); \\ L_{СТ(II)}^{ext} = f_{II}(\theta). \end{cases} \quad (2.1)$$

На рис. 2.1 представлены одна из наиболее распространенных конструктивных разновидностей ОВТД (a) и схематическое изображение электрических соединений ее элементов (b).

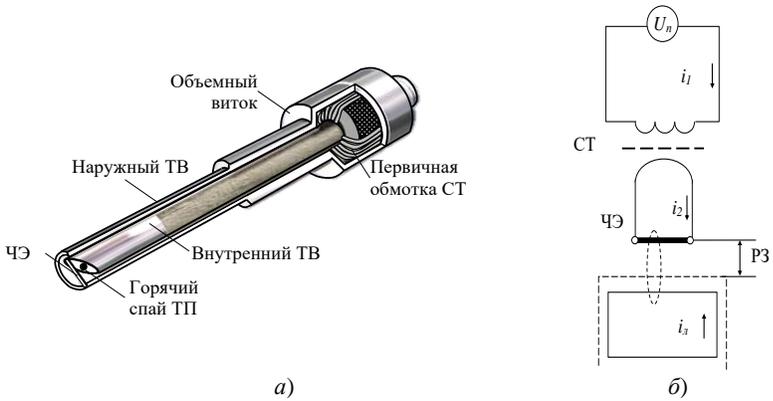


Рис. 2.1. Механическая (а) и электрическая (б) конфигурации ОВТД

Подробное описание механической и электрической конфигураций ОВТД приведено в работе [3]⁵. Однако необходимо подчеркнуть, что во всех ранее разработанных системах измерения РЗ, равно как и в ныне существующих, в ИЦ с включенными в нее ОВТД используется импульсное питание, причем длительность импульса Δt прямоугольной формы не превышает $100 \cdot 10^{-9}$ с, а в момент его окончания фиксируется ток Δi , зависящий только от информативного параметра ОВТД (эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ) и не зависящий от ее активного сопротивления (этот метод известен как «метод первой производной» [1-3], поскольку

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} \approx \left. \frac{di}{dt} \right|_{\Delta t \rightarrow 0}.$$

Следует отметить, что, несмотря на различие в конструктивных разновидностях ОВТД, общий вид и характер изменений (2.1) сохраняется неизменным. Поэтому в настоящем разделе семейство ФП рассматривается для ОВТД одного типоразмера⁶, а для его получения используется известная модель ЭМВ ЧЭ с лопаткой сложной формы, применяемой в турбинах [3]. При

⁵ Описание аналогичных конструкций приведено и в работах [1, 2], а также в обзоре [17], где рассматриваются также ОВТД, предназначенные для решения других задач.

⁶ Длина ЧЭ 8 мм, его сечение 1x1 мм, длина ТВ – 65 мм, наружный диаметр ОВТД в области СТ – 25 мм, высота корпуса СТ – 10 мм.

этом существующая модель была адаптирована к решению новой задачи, что практически ограничилось внесением изменений в исходные данные, касающиеся формы и размеров лопатки (существенно уменьшена кривизна поверхности пера, высота выступов в торцевой части лопатки сведена к нулю). В результате адаптации форма лопатки оказалась близкой к прямоугольной с малой кривизной поверхности пера и отсутствием выступов⁷.

На рис. 2.2 в качестве примера представлены результаты моделирования ЭМВ ЧЭ и торцевой части лопатки, применяемой в компрессоре, полученные для заданных значений координат $y=0,5$ и $2,5$ мм при $x=0$ – это графические изображения изменяющихся во времени эквивалентной индуктивности ЧЭ ($L_{ЧЭ}(t)$) при воздействии напряжением прямоугольной формы с длительностью импульса $\Delta t=100 \cdot 10^{-9}$ с.

Значения эквивалентной индуктивности ЧЭ в момент окончания импульса питания ($100 \cdot 10^{-9}$ с), полученные в предположении нормальных температурных условий (20 °С), используются для определения ФП ЧЭ в виде зависимости его эквивалентной индуктивности в заданном диапазоне изменений РЗ (y) от $0,5$ мм до $2,5$ мм (рис. 2.3). При этом в процессе моделирования для каждого выбранного значения РЗ (y) осуществляется поиск экстремального (минимального) значения $L_{ЧЭ}^{ext}(z)$ путем имитации смещения торца контролируемой лопатки в направлении оси Z с минимально возможным шагом $\Delta z_{ш}$ (что соответствует положению РК I).

Показано также, что при $y \rightarrow \infty$, т.е. при отсутствии лопатки в зоне чувствительности $L_{ЧЭ, \infty}=3,657 \cdot 10^{-9}$ Гн (рис. 2.3, пунктирная линия).

В работе [3] приведены формулы трансформации эквивалентной индуктивности ЧЭ при $y \rightarrow \infty$ в первичную обмотку СТ без учета индуктивности ТВ ($L_{ТВ}=0$)

$$L_{СТ\infty} = n_T^2 L_{ЧЭ\infty} \quad (2.2)$$

и с ее учетом

⁷ Для компрессорной лопатки длина хорды, спинки и корыта [3] составила 29 мм; ширина выходной и входной кромок 2,0 мм; выступов в торцевой части лопатки нет (в модели равны нулю); степень кривизны лопатки определяется изгибом ее спинки и корыта относительно центра хорды и составляет 0,1 мм.

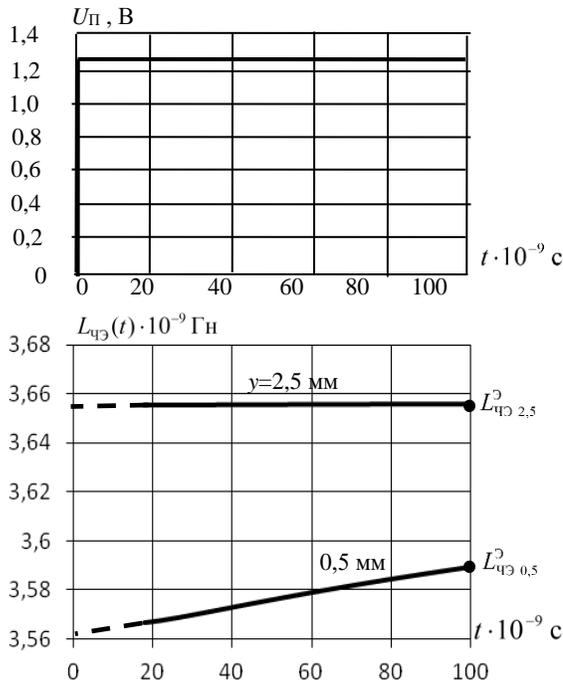


Рис. 2.2. Изменения эквивалентной индуктивности ЧЭ во времени $L_{\text{чэ}}(t)$ при импульсном питании прямоугольной формы

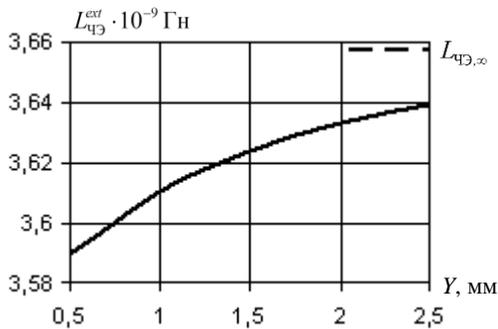


Рис. 2.3. ФП ЧЭ – зависимость $L_{\text{чэ}}^{\text{ext}}$ от координаты y ($L_{\text{чэ}}^{\text{ext}}(y)$)

$$L_{CT\infty} = n_T^2 (L_{ТВ} + L_{ЧЭ\infty}), \quad (2.3)$$

где n_T – коэффициент трансформации, который определяется отношением числа витков первичной обмотки СТ ($w=30$) к $w_{ОВ}=1$, а методика экспериментальной оценки величины $L_{ТВ}$ также приведена в работе [3]⁸.

Экспериментальные исследования, проведенные по этой методике с несколькими ОВТД одного типоразмера, показали, что $L_{ТВ}$ примерно вдвое превышает $L_{ЧЭ\infty}$. При этом выражение (2.3) можно записать в виде:

$$L_{CT\infty} = n_T^2 (k \cdot L_{ЧЭ\infty}), \quad (2.4)$$

где величина коэффициента k подбирается в процессе сравнения $L_{CT\infty}$, вычисленного по формуле (2.4), с результатами экспериментального определения $L_{CT\infty}$ из переходной характеристики ОВТД в ее начальной области ($\Delta t=100 \cdot 10^{-9}$ с).

Для одного из ОВТД, предназначенного для экспериментальных исследований в настоящей работе, величина k оказалась равной 3 при разности расчетных и экспериментальных значений $L_{CT\infty}$ не более 1,5%.

Что же касается пересчета результатов моделирования при наличии лопатки в зоне чувствительности ОВТД (в частности функции $L_{CT}^{ext}(y)$) в первичную обмотку СТ, то предлагается использовать выражение

$$L_{CT}^{ext}(y) = L_{CT\infty} - \Delta L_y, \quad (2.5)$$

где $\Delta L_y = n_T^2 \cdot (k^* \cdot \Delta L_{ЧЭ})$, а $\Delta L_{ЧЭ} = L_{ЧЭ\infty} - L_{ЧЭ}^{ext}(y)$, k^* – коэффициент, который, как и коэффициент k , зависит от соотношения индуктивностей ТВ и ЧЭ, хотя и может отличаться от него по величине. Для выбранного ОВТД оба коэффициента оказались равными ($k=k^*=3$) и, что особенно важно, это обеспечивает хорошее совпадение приведенных значений $\Delta L_y \left(\frac{\Delta L_y}{L_{CT\infty}} \right)$ при

⁸ В настоящее время так называемая интегрированная модель ЭМВ ЧЭ с остальными элементами конструкции, в т.ч. с ТВ, ОВ и самим ЧЭ, с учетом их объема и формы (разумеется, при известной картине распределения температуры по объему ОВТД в его рабочем состоянии) по-прежнему находится в разработке [18]. Поэтому вопросы трансформации результатов моделирования ЭМВ ЧЭ и лопатки, а также количественной оценки влияния температуры на ОВТД решаются экспериментально.

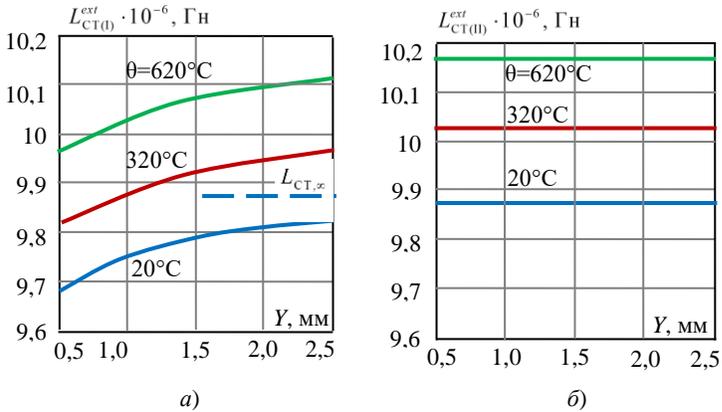


Рис. 2.4. Семейство ФП ОВТД: $L_{CT(I)}^{ext} = f_I(y, \theta)$ (а), $L_{CT(II)}^{ext} = f_{II}(\theta)$ (б)

минимальном РЗ ($y=0,5$ мм), полученных путем моделирования и экспериментально (именно приведенные значения ΔL_y оказывают определяющее влияние на ФП ИЦ). Необходимо отметить, что фактически в процессе выбора коэффициентов k и k^* осуществляется верификация результатов моделирования и при ее успешном завершении появляется возможность проведения необходимых исследований на модели, отказавшись от натуральных экспериментов и тем более тех, что труднореализуемы.

На рис. 2.4 результаты моделирования (после пересчета по формулам (2.4), (2.5)) представлены как графики $L_{CT(I)}^{ext}$ в зависимости от координаты y (РЗ) при нормальной температуре 20°C (а). С увеличением y (РЗ) величина L_{CT}^{ext} возрастает и при $y \rightarrow \infty$ могла бы достигнуть предельно возможного значения $9,874 \cdot 10^{-6}$ Гн ($L_{CT,\infty}$), которое показано пунктирной линией (а). Но именно это значение соответствует эквивалентной индуктивности $L_{CT(II)}^{ext}$ в межлопаточных промежутках при отсутствии влияния контролируемой и соседних лопаток. Поэтому на рис. 2.4, б график $L_{CT(II)}^{ext}$ от y – это прямая, параллельная оси Y (с учетом влияния соседних лопаток (с уменьшением шага установки лопаток) величина становится зависимой от РЗ (y) и горизонтальность графиков нарушается).

Влияние температурных воздействий на $L_{СТ}^{ext}$ определялось экспериментально для группы ОВТД одного типоразмера в специально разработанной и изготовленной термокамере. Результаты эксперимента показали, что изменения $L_{СТ}^{ext}$ в среднем для группы с незначительными отклонениями составляют 1,5% на 300 °С и 3% на 600 °С (600 °С ÷ 650 °С - номинальная температура в газовоздушном тракте компрессора).

Поэтому для получения семейств ФП (2.1) в полном объеме каждая ордината ФП $L_{СТ(i)}^{ext}$ при 20°С должна быть увеличена на 1,5% (до 320°С) и 3% (до 620°С).

Как было показано в разделе 1.4 для преобразования радиальных и осевых смещений торцов лопаток (координаты y и x) используется кластер из двух ОВТД, центры ЧЭ которых от начала координат (точка O) по оси X смещены в противоположных направлениях (обычно на ± 1 мм). При этом семейство ФП представляется как

$$\begin{cases} L_{СТ1(i)}^{ext} = f_{1(i)}(x, y, \theta); \\ L_{СТ2(i)}^{ext} = f_{2(i)}(x, y, \theta); \\ L_{СТ(ii)}^{ext} = f_{ii}(\theta); \end{cases} \quad (2.6)$$

причем величина $L_{СТ(ii)}^{ext}$ не зависит от изменений x и y , оставаясь равной $9,87 \cdot 10^{-6}$ Гн ($L_{СТ\infty}$) в нормальных температурных условиях (20 °С). Вместе с тем увеличение температуры приводит к увеличению $L_{СТ(ii)}^{ext}$, которое показано на рис. 2.4, б и здесь не рассматривается.

Для получения семейства ФП (2.6) (по аналогии с семейством ФП (2.1)) использовалась модель ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки. Однако в процессе моделирования эквивалентная индуктивность ЧЭ определялась как функция двух переменных – координат y и x ($L_{ЧЭ}^{ext}(x, y)$). При этом изменения y производились в диапазоне 0,5 ÷ 2,5 мм при постоянных значениях $x=0, +5,0$ и $-5,0$ мм в условиях нормальной температуры (20 °С) (рис. 2.5).

Результаты моделирования ($L_{ЧЭ}^{ext}(x, y)$) пересчитываются в первичную обмотку СТ по формуле, аналогичной (2.5) по внешнему виду, но отличающейся содержанием

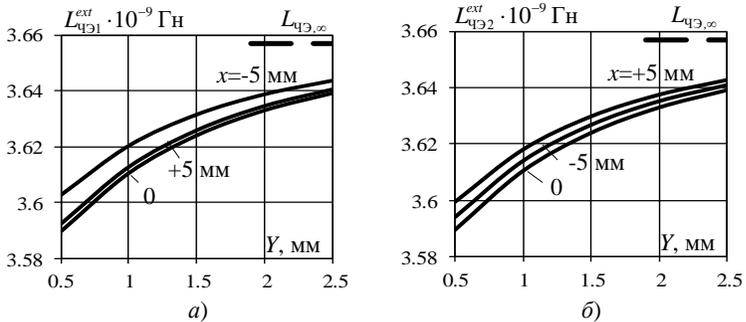


Рис. 2.5. Зависимости $L_{\text{ЧЭ1}}^{\text{ext}}$ и $L_{\text{ЧЭ2}}^{\text{ext}}$ от координат x, y ($L_{\text{ЧЭ1}}^{\text{ext}}(x, y)$ и $L_{\text{ЧЭ2}}^{\text{ext}}(x, y)$)

$$L_{\text{СТ}}^{\text{ext}}(x, y) = L_{\text{СТ}\infty} - \Delta L_{x,y}, \quad (2.7)$$

где $L_{\text{СТ}\infty}$ вычисляется по формуле (2.4), $\Delta L_{x,y} = n_1^2 \cdot (k^* \cdot \Delta L_{\text{ЧЭ}})$, а $\Delta L_{\text{ЧЭ}} = L_{\text{ЧЭ}\infty} - L_{\text{ЧЭ}}^{\text{ext}}(x, y)$, $k=k^*=3$.

На рис. 2.6 представлены семейства ФП (2.6), полученные после пересчета результатов моделирования при нормальной температуре (20 °С), а также те же семейства, рассчитанные для температур 320 °С и 620 °С по экспериментальным данным⁹.

Из графиков на рис 2.6 следует, что все значения эквивалентных индуктивностей, зависящие от координаты y при $x = -5$ мм и $+5$ мм, превышают подобные зависимости при нулевых значениях x . Это означает немонотонный характер исследуемых функций от координаты x при постоянных значениях y . Поэтому для бóльшей наглядности и подтверждения немонотонности рассматриваемые семейства ФП изображены на рис. 2.7.

⁹ При моделировании кластера из двух датчиков (ОВТД₁ и ОВТД₂) предполагается полная идентичность их эквивалентных параметров и семейств ФП при одинаковом размещении центров ЧЭ₁ и ЧЭ₂ (например в точке O системы отсчета) и разворота относительно координатных осей. Очевидно, что смещения центров ЧЭ по оси X (± 1 мм) приводит к изменениям и соответствующим смещениям графиков ФП при сохранении их вида.

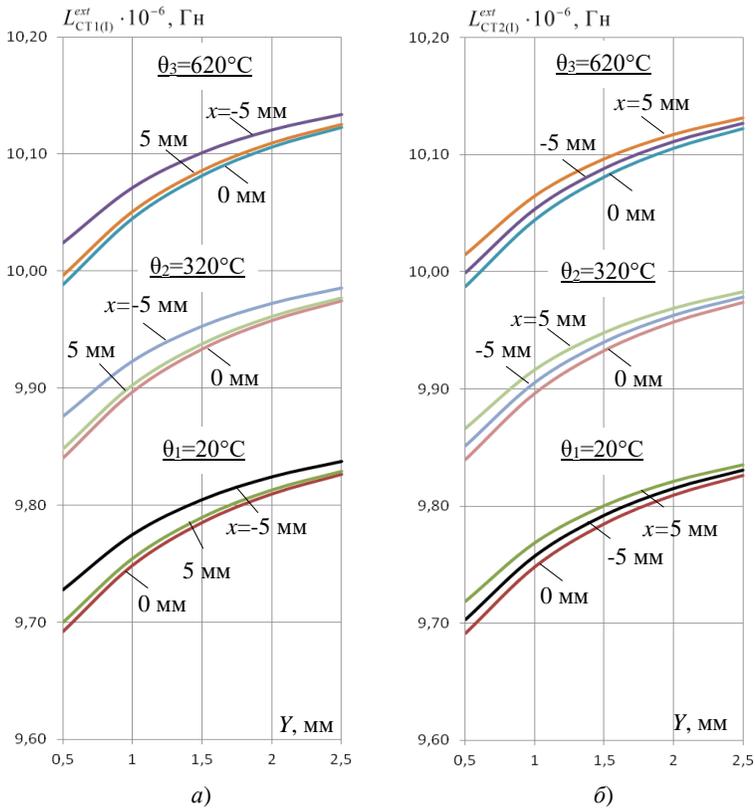


Рис. 2.6. Семейства ФП кластера ОВТД при нормальной температуре и температурах 320°C и 620°C ($L_{CT1(0)}^{ext}$) (а) и $L_{CT2(0)}^{ext}$) (б) в зависимости от y при постоянных x (-5, 0, +5, 0 мм)

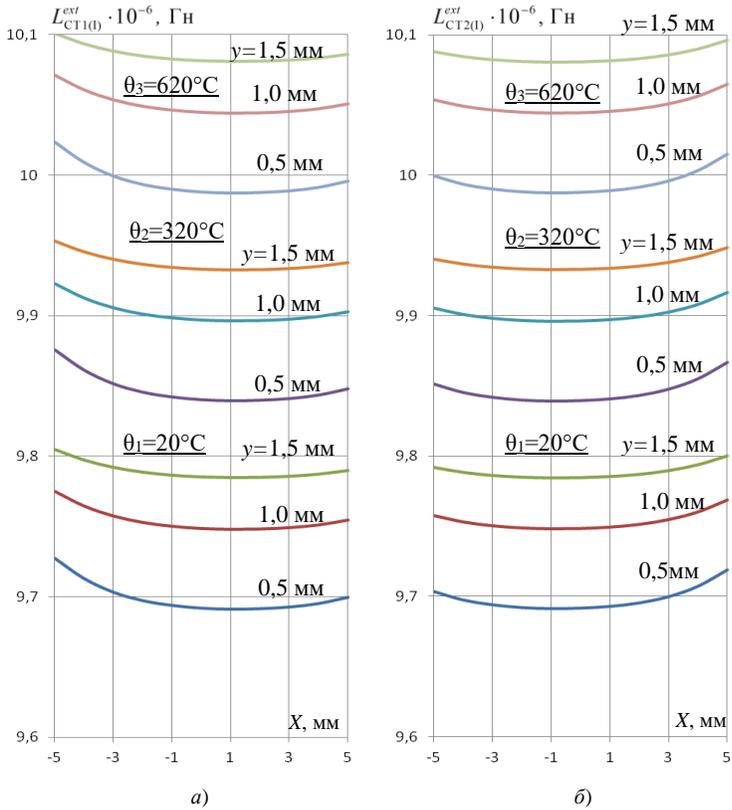


Рис. 2.7. Семейства ФП кластера ОВТД при нормальной температуре и температурах 320°C и 620°C ($L_{CT1(0)}^{ext}$ (а) и $L_{CT2(0)}^{ext}$ (б) в зависимости от x при постоянных y (0,5; 1,0 и 1,5 мм)

2.2. Семейства функций преобразования измерительной цепи

На рис. 2.8 представлена структурно-функциональная схема ИЦ, которая отличается от известных аналогов [19] дифференциальной схемой, в одну из ветвей которой включен ОВТД, а в другую – его имитатор (ИОВТД) [5, 15].

Схема содержит источник постоянного напряжения E и бесконтактный ключевой элемент K , формирующий импульсы питания прямоугольной формы и малой длительности Δt , преобразователи «ток-напряжение» (ПТН₁ и ПТН₂), масштабирующий усилитель (МУс) и АЦП с входным напряжением положительной полярности. Управление ключом K производится от высокочастотного генератора, обеспечивающего повышенную стабильность длительности импульсов Δt .

Предполагается, что индуктивность ИОВТД $L_1 = L_{И} = L_0 - L_{д}$, причем величина $L_{д}$ должна соответствовать условию $L_{д} \geq \Delta L_{y,max}$ [15], а $L_2 = L_{СТ(0)}^{ext} = L_0 + \Delta L_0 - \Delta L_y$ в положении РК I, где $L_0 = L_{СТ,\infty}$, ΔL_0 согласно разделу 1.1 – изменения индуктивности, связанные с температурными воздействиями θ на ОВТД, а ΔL_y – связанные с изменениями РЗ (y).

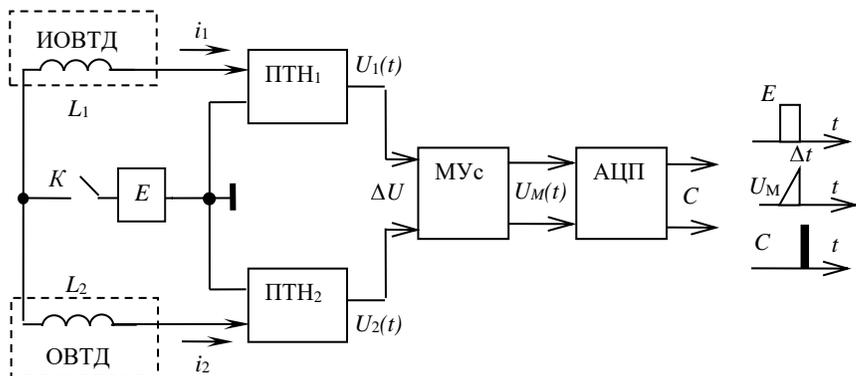


Рис. 2.8. Структурно-функциональная схема ИЦ и временная диаграмма ее работы

Пусть в момент времени $t = 0$ появилось напряжение питания E . Тогда $E = L_1 \frac{di_1}{dt} \approx L_1 \frac{\Delta i_1}{\Delta t}$ и $E = L_2 \frac{di_2}{dt} \approx L_2 \frac{\Delta i_2}{\Delta t}$, а разностное напряжение на выходах ПТН₁ и ПТН₂ ($U_1 - U_2$) примет вид:

$$\Delta U_I = E \left(\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} \right) = E \left(\frac{\Delta L_\theta}{L_0} + \frac{L_\pi}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} \right) \cdot \frac{1}{1 - \frac{L_\pi}{L_0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta L_\theta}{L_0} - \frac{L_y}{L_0}}, \quad (2.8)$$

(предполагается, что $R \frac{\Delta t}{L_0} = 1$, где $R = R_1 = R_2$ (R_1, R_2 – резисторы обратной связи в ПТН₁ и ПТН₂ соответственно)).

Если в знаменателях дробных множителей в выражении (2.8) пренебречь слагаемыми $\frac{\Delta L_\theta}{L_0}$, $\frac{L_\pi}{L_0}$ и $\frac{\Delta L_y}{L_0}$, то код C_I на выходе идеализированной ИЦ примет вид:

$$C_I = K_M K_C \Delta U_I \approx K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_\theta}{L_0} + \frac{L_\pi}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} \right), \quad (2.9)$$

где K_M – коэффициент масштабирования МУс, K_C – коэффициент с размерностью 1/В.

В положении РК II L_1 остается без изменений, $L_2 = L_{CT(II)}^{ext} = L_0 + \Delta L_\theta$, а разностное напряжение с выходов ПТН₁ (U_1) и ПТН₂ (U_2)

$$\Delta U_{II} = E \left(\frac{\Delta L_\theta}{L_0} + \frac{L_\pi}{L_0} \right) \cdot \frac{1}{1 - \frac{L_\pi}{L_0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta L_\theta}{L_0}}. \quad (2.10)$$

Тогда, пренебрегая в знаменателе дробных множителей слагаемыми $\frac{\Delta L_\theta}{L_0}$, $\frac{L_\pi}{L_0}$, код C_{II} на выходе идеализированной ИЦ можно записать в виде

$$C_{II} = K_M K_C \Delta U_{II} \approx K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_0}{L_0} + \frac{L_d}{L_0} \right). \quad (2.11)$$

С учетом выражений (2.9) и (2.11) разность кодов C_{II} и C_I имеет вид

$$\Delta C = C_{II} - C_I = K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_y}{L_0} \right). \quad (2.12)$$

и не зависит от температурных воздействий.

В работе [5] приведено описание еще одного варианта ИЦ, в которой также используется ИОВТД, но он включен в противоположную ветвь дифференциальной схемы на рис. 2.8, а его индуктивность выбирается больше, чем L_0 на величину L_d^* , которая определяется максимально возможным изменением $\Delta L_{\theta, max}$ ($L_d \geq \Delta L_{\theta, max}$).

Тогда в положении РК I $L_1 = L_0 + L_0 - \Delta L_y$, $L_2 = L_0 + L_d^*$, и все последующие преобразования аналогичные тем, что выполнялись ранее в первом варианте ИЦ, здесь не приводятся, а даны лишь конечные результаты.

В частности, разностное напряжение с выходов ПТН₁ и ПТН₂ (в положении РК I) имеет вид

$$\Delta U_I = E \left(\frac{L_d^*}{L_0} - \frac{\Delta L_0}{L_0} + \frac{\Delta L_y}{L_0} \right) \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta L_0}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} \right) \cdot \left(1 + \frac{L_d^*}{L_0} \right)}, \quad (2.13)$$

а код АЦП на выходе ИЦ $C_I = K_M K_C (\Delta U_I)$, но, если в знаменателе дробного множителя выражения (2.13) пренебречь слагаемыми $\frac{L_d^*}{L_0}$, $\frac{\Delta L_0}{L_0}$ и $\frac{\Delta L_y}{L_0}$, то код АЦП на выходе идеализированной ИЦ

$$C_I \approx K_M K_C E \left(\frac{L_d^*}{L_0} - \frac{\Delta L_0}{L_0} + \frac{\Delta L_y}{L_0} \right). \quad (2.14)$$

В положении РК II $L_1 = L_0 + L_0$ и $L_2 = L_{II} = L_0 + L_d^*$. По аналогии с выражениями (2.13, 2.14) можно записать

$$\Delta U_{II} = E \left(\frac{L_d^*}{L_0} - \frac{\Delta L_0}{L_0} \right) \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta L_0}{L_0} \right) \cdot \left(1 + \frac{L_d^*}{L_0} \right)}, \quad (2.15)$$

а также $C_{II} = K_M K_C (\Delta U_{II})$. Или пренебрегая теми же слагаемыми $\frac{L_d^*}{L_0}$, $\frac{\Delta L_0}{L_0}$ и

$\frac{\Delta L_y}{L_0}$ в знаменателе дробного множителя в выражении (2.15), код C_{II} примет вид

$$C_{II} \approx K_M K_C E \left(\frac{L_d^*}{L_0} + \frac{\Delta L_0}{L_0} \right). \quad (2.16)$$

Поскольку в выражениях для ΔU_I (2.13), а также для ΔU_{II} (2.15) величина L_d^* обычно больше величины ΔL_0 , то напряжения ΔU_I и ΔU_{II} всегда положительны, а потому нет необходимости в инвертировании, осуществляемом МУС в схеме ИЦ, приведенной на рис. 2.8.

Необходимо особо подчеркнуть, что коды C_I ((2.9), (2.14)) и C_{II} ((2.11), (2.16)) являются результатами преобразований, выполняемых в ИЦ. Однако, такое утверждение справедливо только для экстремальных значений указанных кодов, поиск которых осуществляется методами и средствами цифровой обработки. Разность кодов C_{II} и C_I , полученная для второго варианта

$$\Delta C = C_{II} - C_I \approx K_M K_C E \left(-\frac{\Delta L_y}{L_0} \right), \quad (2.17)$$

и в отличие от первого варианта (2.12) имеет отрицательный знак.

Далее проводится сравнительный анализ изменений кодов C на выходе ИЦ во времени t (или в зависимости от координаты z) и их экстремальных значений C_I и C_{II} для лопаток под номерами 1, 2, 3... По результатам анализа выбирается один из двух вариантов ИЦ для проведения дальнейших исследований (в т.ч. получения семейств ФП ИЦ) и использования в действующем макете системы измерения.

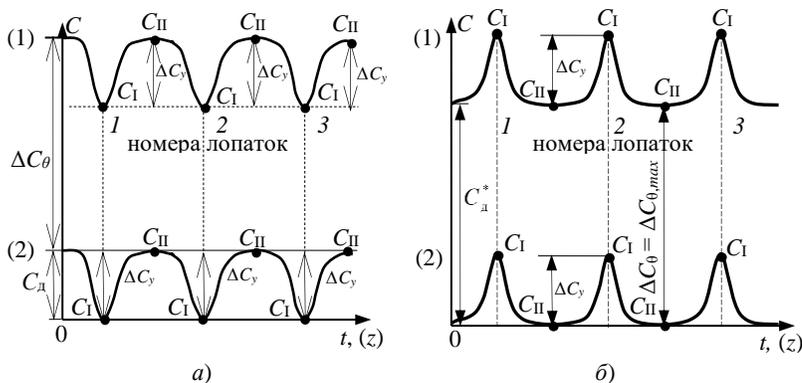


Рис. 2.9. Функции $C(t)$ ($C(z)$) в вариантах ИЦ первом (а) и втором (б) при номинальной (1) и нормальной (2) температурах (θ)

На рис. 2.9 представлены функции $C(t)$ ($C(z)$) обоих вариантов ИЦ – первого (а) и второго (б). В первом варианте ИЦ (а) введены обозначения составляющих кодов $C_I = \Delta C_\theta + C_d - \Delta C_y$, $C_{II} = \Delta C_\theta + C_d$, где $\Delta C_\theta = K_M K_C E \cdot \frac{\Delta L_\theta}{L_0}$, $C_d = K_M K_C E \cdot \frac{L_d}{L_0}$, $\Delta C_y = K_M K_C E \cdot \frac{\Delta L_y}{L_0}$, причем предполагается, что составляющая ΔC_θ соответствует номинальным значениям температуры, а $L_d = \Delta L_{y,max}$ (эпюра 1).

При этом ресурс АЦП, который определяется его разрядностью, определяется между двумя составляющими - ΔC_θ , максимальное значение которой зависит от отношения $\frac{\Delta L_\theta}{L_0}$ (в компрессоре $\left. \frac{\Delta L_\theta}{L_0} \right|_{max} = 0,03$ (3%)) и C_d , величина которой определяется отношением $\frac{L_d}{L_0} = \frac{\Delta L_{y,max}}{L_0} = 0,02$ (2%) (при изменении y (РЗ) от ∞ до 0,5 мм). Если диапазон изменений РЗ (y) уменьшается, например, до 1 мм (0,5÷1,5 мм), то $\frac{\Delta L_y}{L_0} = 0,01$ (1%), а ΔC_θ втрое превышает ΔC_y , что является своеобразной «платой» за самокомпенсацию температурных воздействий на ОВД.

Если в ИЦ используется 10-разрядный АЦП, то на рис. 2.9, *a* нулевому значению кода будет соответствовать минимум РЗ, а его максимуму (1023) – экстремальные коды межлопаточных промежутков при номинальной температуре (620 °С).

При использовании тех же обозначений составляющих ΔC_θ , ΔC_y , а также C_d^* , определяемой $L_d^* = \Delta L_{\theta, \max}$, для второго варианта ИЦ можно записать $C_I = C_d^* - \Delta C_\theta + \Delta C_y$, $C_{II} = C_d^* - \Delta C_\theta$. При этом по сравнению с аналогичными выражениями C_I и C_{II} для первого варианта ИЦ произошло практически трехкратное увеличение C_d^* и смена знака на противоположный у слагаемых ΔC_θ , ΔC_y . Если предположить, что температурные условия в проточной части нормальные ($\Delta C_\theta = 0$), то $C_I = C_d^* + \Delta C_y$ и код АЦП соответствует максимально возможному значению (1023 в 10-разрядном АЦП) (эпюра 1, рис. 2.9, *б*). Если $\Delta C_\theta = \Delta C_{\theta, \max}$ (температура номинальная), то $C_{II} = C_d^* - \Delta C_{\theta, \max} = 0$ (эпюра 2, рис. 2.9, *б*).

Иначе говоря, в рассмотренных вариантах ИЦ наблюдаются противоположные результаты – в первом варианте ИЦ с увеличением РЗ и температуры код на выходе ИЦ (АЦП) возрастает, а во втором варианте при том же характере изменений РЗ и температуры, напротив, уменьшается. В этой связи исключительно по эргономическим соображениям семейство ФП ИЦ в настоящем разделе определяется для первого варианта ИЦ, и в последующих разделах это семейство ФП использовалось в процессе проектирования системы измерения, а также в исследованиях влияния МФ и погрешностей измерения РЗ. При этом необходимо подчеркнуть, что у второго варианта ИЦ нет никаких видимых ограничений на реализацию и применение в системах измерения РЗ.

Семейство ФП ИЦ, которое ориентировано на первый вариант ИЦ (рис. 2.8) можно записать в виде, подобном семейству ФП ОВТД:

$$\begin{cases} C_I = f_{\text{ИЦ(I)}}(y, \theta); \\ C_{II} = f_{\text{ИЦ(II)}}(\theta). \end{cases} \quad (2.18)$$

При этом в качестве исходных данных используется семейство ФП ОВТД (рис. 2.4) и результаты анализа ИЦ (с той же целью можно было бы

использовать существующую модель ИЦ в виде системы дифференциальных уравнений с переменной во времени эквивалентной индуктивностью первичной обмотки СТ, где в качестве исходных данных используются результаты моделирования ЭМВ ЧЭ ОВГД с торцевой частью лопатки [20]. Однако такой путь представляется более громоздким и менее наглядным, чем принятый здесь способ определения семейства ФП ИЦ.

Как следует из описания ИЦ, при использовании 10-разрядного АЦП (микросхема AD9200) согласно его паспортным данным напряжение на входе должно изменяться в пределах от 0 до +1В. Нулевое значение имеет место при напряжении на выходе МУс, равном 0, что возможно при условии

$$\frac{\Delta L_0}{L_0} = 0 \text{ и } \frac{L_d}{L_0} = \frac{\Delta L_{y,max}}{L_0}. \text{ Предполагается, что достижение верхней границы}$$

входного напряжения обеспечивают выбранные параметры дифференциальной схемы на входе ИЦ (амплитуда и длительность импульсного питания (E , Δt), величина сопротивления резисторов R_1 , R_2 (R) в цепях обратной связи ПТН₁, ПТН₂) и параметры МУс (коэффициента K_M) при максимально воз-

можном значении $\frac{\Delta L_0}{L_0}$, выбранном $\frac{L_d}{L_0}$ (в положении РК I) и любых значе-

ниях $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ (в положении РК II).

Но в 10-разрядном АЦП нулевому входному напряжению соответствует 0 выходного кода, а напряжению +1В – код 1023. При этом графические изображения искомым семейств ФП ИЦ (в виде зависимостей (2.18)) должны вписываться в указанный диапазон изменений кода, а сумма его составляющих $\Delta C_0 + C_d$ (где ΔC_0 – максимально возможная величина), равная

1023, распределяется в соответствии с величинами $\frac{\Delta L_0}{L_0} = 0,03$ (3%) и

$$\frac{L_d}{L_0} = \frac{\Delta L_{y,max}}{L_0} = 0,02 \text{ (2\%), т.е., округляя, } \Delta C_0 \approx 600 \text{ и } C_d = C_{y,max} \approx 400 \text{ единиц}$$

кода (причем код $C_1 = 0$ при $y = 0,5$ мм и монотонно возрастает примерно до 200 единиц при $y = 1,5$ мм).

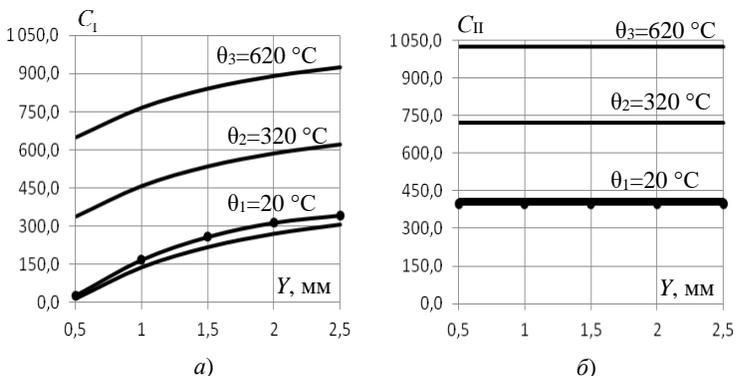


Рис. 2.10. Семейства ФП ИЦ $C_I = f_{\text{ИЦ}(I)}(y, \theta)$ (а) и $C_{II} = f_{\text{ИЦ}(II)}(\theta)$ (б)

Используя результаты моделирования $L_{\text{ЧЭ}}^{\text{ex}}(y)$ и расчета $L_{\text{СТ}(I)}^{\text{ex}}(y)$ (рис. 2.4), можно построить график $C_I = f_{\text{ИЦ}(I)}(y)$ при нормальной температуре (20°C), а с учетом $\Delta C_\theta = 300$ и 600 единиц кода – остальные графики семейства ФП ИЦ при $\theta = 320^\circ\text{C}$ и 620°C (рис. 2.10, а). Семейство ФП ИЦ $C_{II} = f_{\text{ИЦ}(II)}(\theta)$ представлено на рис. 2.10, б – это горизонтальные прямые, соответствующие температурам 20°C , 320°C , 620°C (составляющая ΔC_θ изменяется на 600 единиц от примерно 400 до верхней границы -1023).

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что (в отличие от выше приведенных приближенных оценок составляющих кодов ΔC_θ , C_d и ΔC_y) графики семейств ФП ИЦ выполнены в строгом соответствии с результатами моделирования ЭМВ ЧЭ и лопатки, расчетов семейств ФП ОВТД. Вместе с тем необходимо отметить, что абсолютная идентичность в характере их изменений возможна только при идеализации ИЦ, когда выражения (2.8) и (2.10), характеризующие разностные напряжения ΔU_I и ΔU_{II} , а следовательно, и в выражениях (2.9) и (2.11), характеризующих коды C_I и C_{II} не учитываются слагаемые в знаменателях дробных множителей. С их учетом коды C_I , C_{II} и, что особенно важно, их разность ΔC (выражение 2.12) становятся, хотя и в незначительной степени, но зависимыми от температуры (возможности устранения такого рода «недокомпенсации» температурных воздействий упоминаются в работе [5], но более подробно рассматриваются в разделе 5.1).

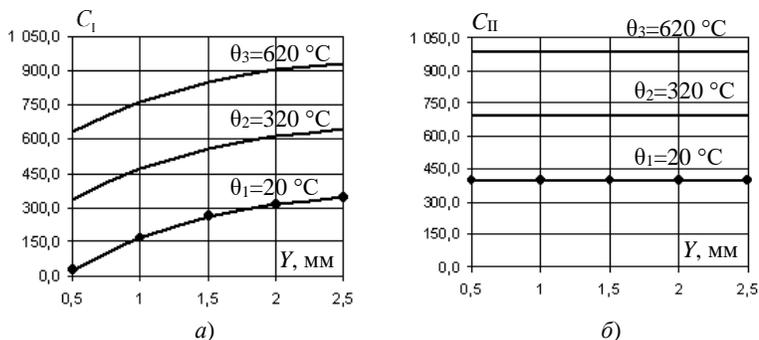


Рис. 2.11. Семейства ФП ИЦ – $C_I = f_{\text{ИЦ(I)}}(y, \theta)$ (а) и $C_{II} = f_{\text{ИЦ(II)}}(\theta)$ (б), полученные экспериментально

На рис. 2.11 представлено семейство ФП, полученное экспериментально. При этом функция $C_I = f_{\text{ИЦ(I)}}(y, \theta)$ определялась с помощью градуировочного устройства и индикатора часового типа с разрешающей способностью 0,010 мм при нормальной температуре (20°C) (а). Для получения остальных функций семейства при температурах 320°C и 620°C использовались ранее приведенные экспериментальные данные. Те же данные использовались при получении семейства ФП $C_{II} = f_{\text{ИЦ(II)}}(\theta)$, но при $y \rightarrow \infty$ (б).

Представляется очевидной идентичность в характере изменений семейств ФП, полученных расчетным путем и экспериментально (рис. 2.10 и 2.11). Для получения количественных сравнительных оценок график функции $C_I(y)$, полученный экспериментально при $\theta = 20^\circ\text{C}$, изображен на рис. 2.11, а в виде сплошной линии с обозначенными на ней значениями C_I (это точки, соответствующие значениям y , равным 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 мм).

Минимальные расхождения в значениях кодов наблюдаются при $y = 0,5$ мм и $y \rightarrow \infty$. На рис. 2.10 они малозаметны, но реально достигают при $y = 0,5$ мм 12 единиц, что составляет около 3% относительно девиации кодов в диапазоне y от 0,5 мм до ∞ (около 390 единиц), а при $y \rightarrow \infty$ - 3 единицы, что составляет 0,8%. Расхождение возрастает с увеличением y от 0,5 мм и при 2,0 мм становится равным 50 единицам (около 13%) и далее уменьшается с увеличением y .

Следует отметить, что небольшое расхождение кодов при $y=0,5$ мм означает и правильный выбор коэффициента k^* , который ориентирован (см. раздел 2.1) на равенство соответствующих приведенных значений ΔL_y $\left(\frac{\Delta L_y}{L_0}\right)$, полученных на модели и экспериментально. По результатам моде-

лирования при $y=0,5$ мм $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ составляет 0,0185. По результатам экспери-

мента, приведенным на рис. 2.11 $\frac{\Delta L_y}{L_0} = 0,0183$, и это означает их равенство

с погрешностью около 0,5% (для определения экспериментального значения $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ при $y=0,5$ мм по ФП ($\theta = 20$ °С) фиксируется код C_I , а также код C_{II}

(рис. 2.11). Далее с помощью выражений (2.14) и (2.16) по найденным значениям кодов C_I и C_{II} , а также известным значениям коэффициентов K_M , K_C и параметрам ИЦ (напряжению питания, сопротивлениям обратной связи

ПТН, интервалу времени Δt и др.) вычисляются отношения $\frac{\Delta L_n}{L_0}$ и искомые

$$\frac{\Delta L_y}{L_0}.$$

Далее определяются семейства ФП ИЦ, в которых реализуется кластерный метод (раздел 1.4). При этом следует иметь в виду необходимость двух ИЦ (ИЦ₁ и ИЦ₂), функционирующих параллельно и независимо друг от друга. Поэтому и семейства ФП адресованы для каждой из них, которые можно записать в виде

$$\begin{cases} C_{1(I)} = f_{ИЦ1(I)}(x, y, \theta); \\ C_{1(II)} = f_{ИЦ1(II)}(\theta); \\ C_{2(I)} = f_{ИЦ2(I)}(x, y, \theta); \\ C_{2(II)} = f_{ИЦ2(II)}(\theta). \end{cases} \quad (2.19)$$

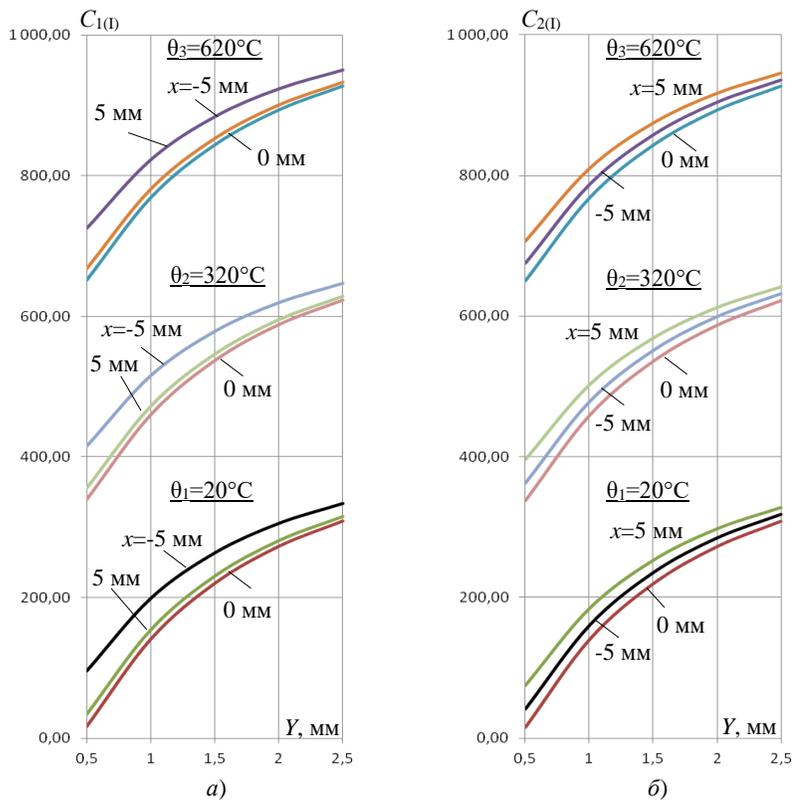


Рис. 2.12.- Семейства ФП ($C_{1(t)}=f_{иц1(t)}(y,\theta)$ и $C_{2(t)}=f_{иц2(t)}(y,\theta)$) при $x=-5; 0; +5$ мм

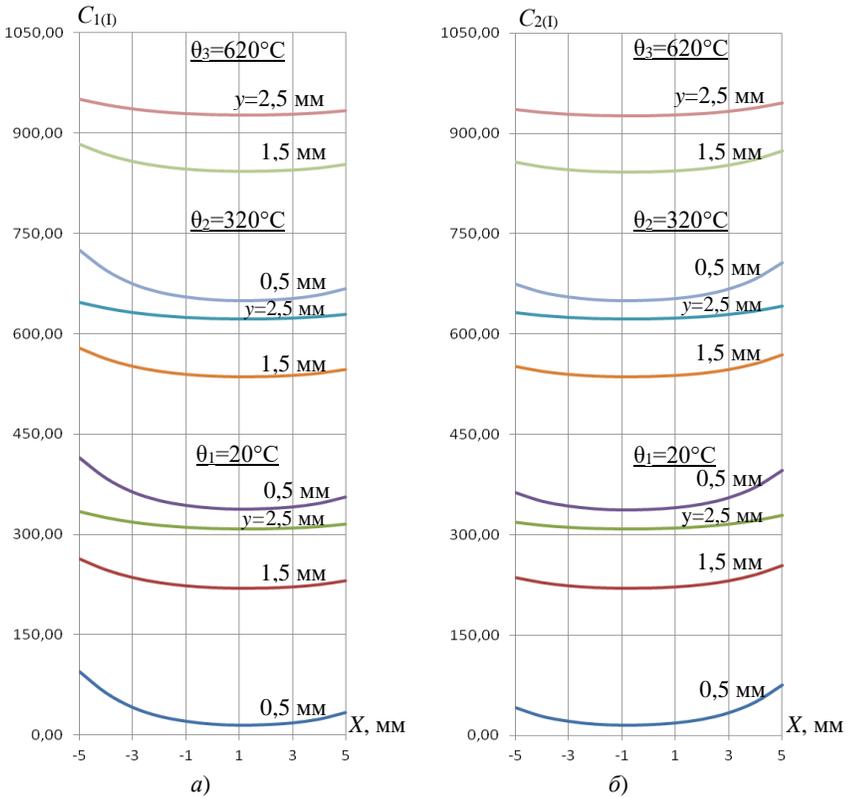


Рис. 2.13. Семейства ФП ($C_{1(t)}=f_{иц1(t)}(x,\theta)$ и $C_{2(t)}=f_{иц2(t)}(x,\theta)$) при $y=0,5; 1,5; 2,5$ мм

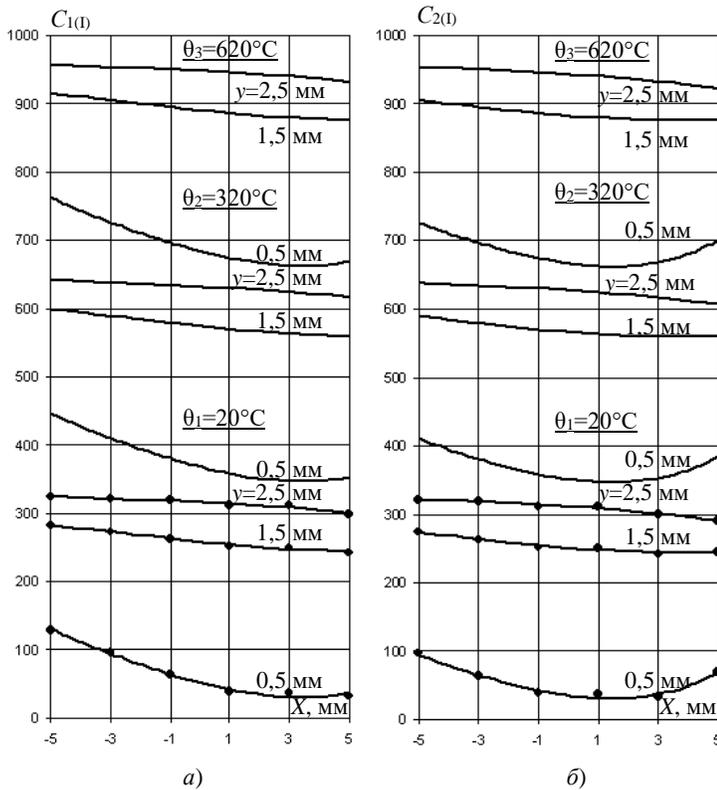


Рис. 2.14. Семейства ФП ($C_{1(t)}=f_{иц1(t)}(x,\theta)$ и $C_{2(t)}=f_{иц2(t)}(x,\theta)$) при $y=0,5; 1,5; 2,5$ мм, полученные экспериментально

Графики функций $C_{1(i)} = f_{иц1(i)}(\theta)$ и $C_{2(i)} = f_{иц2(i)}(\theta)$ соответствуют тому графику, что представлен на рис. 2.10, б.

Результаты расчета семейств $C_{1(i)} = f_{иц1(i)}(x, y, \theta)$ и $C_{2(i)} = f_{иц2(i)}(x, y, \theta)$ представлены на рис. 2.12¹⁰ как зависимости кодов от координаты y при постоянных значениях координаты x (-5; 0; +5 мм). При этом характер этих зависимостей аналогичен тем, что изображены на рис. 2.6, но границы диапазонов изменений кодов на осях ординат оказались, хотя и незначительно, но смещенными для $x = -5$ мм и $x = +5$ мм.

Те же семейства ФП, как зависимости от координаты x при постоянных значениях координаты y , по внешнему виду аналогичны семействам ФП ОВТД (рис. 2.7) и представлены на рис. 2.13.

На рис. 2.14 представлены семейства ФП, полученные экспериментально, для сравнения с теми, что представлены на рис. 2.13. Сравнение показывает идентичный характер их изменений как по координате x , так и по y .

Заключение к разделу 2

С помощью существующей модели ЭМВ ЧЭ ОВТД с торцевой частью лопатки, применяемой в турбине, адаптированной к форме и размерам лопаток, применяемых в компрессоре, получены зависимости эквивалентной индуктивности ЧЭ от времени для заданных значений x, y -координат, которые использованы для получения зависимости эквивалентной индуктивности ЧЭ от координаты y (РЗ), а также кластера ЧЭ₁ и ЧЭ₂ от x, y -координат.

Приведены результаты экспериментальных исследований температурных воздействий на информативный параметр – эквивалентную индуктивность первичной обмотки группы ОВТД одного типоразмера. Показано, что изменения температуры от нормальной (20 °С) на 300 °С и 600 °С составляют в среднем (с небольшими отклонениями) 1,5% и 3% соответственно.

Получено семейство ФП ОВТД в виде зависимостей эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ в положении РК I от РЗ (y -координаты) и температуры, а также индуктивности СТ в положении РК II от температуры применительно к предложенному методу измерения РЗ. При этом используются ранее полученные путем моделирования зависимости эквивалентной индуктивности ЧЭ от РЗ (y) для нормальных температурных условий, которая трансформируется (пересчитывается) в первичную обмотку СТ

¹⁰ Предполагается, что центры ЧЭ₁ и ЧЭ₂ смещены относительно точки O (начала системы отсчета) на $x=-1$ мм и $x=+1$ мм соответственно.

с учетом дополнительных коэффициентов k и k^* , зависящих от индуктивности ТВ, величина которых, в свою очередь, корректируется при сравнении результатов моделирования с результатами эксперимента (k – при отсутствии лопатки, k^* – при ее наличии). Завершающий этап получения семейства ФП ОВТД сводится к интегрированию результатов экспериментальных исследований температурных воздействий и ФП ОВТД, полученной путем моделирования, для нормальной температуры (20 °С) (при этом каждое значение функции увеличивается на 1,5%, а затем и на 3,0% в соответствии изменениям температуры на 300 °С и 600 °С).

Аналогичным образом определяются семейства ФП для кластера ОВТД (ОВТД₁ и ОВТД₂), применительно к предложенному методу измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток. Однако, в этом случае семейства ФП представляют собой зависимости эквивалентных индуктивностей первичных обмоток СТ ОВТД₁ и ОВТД₂ не только от РЗ (y), но и от ОС (x) торца лопатки, а также от температуры в положении РК I. В положении РК II эквивалентные индуктивности СТ зависят только от температуры (как и в предложенном методе измерения РЗ).

Проведен анализ двух вариантов ИЦ с приближенным дифференцированием, которые отличаются местоположением ИОВТД в дифференциальной схеме на ее входе и величиной его эквивалентной индуктивности.

Для обоих вариантов ИЦ в аналитическом виде получены выражения цифровых кодов АЦП на выходе ИЦ в зависимости от изменений эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ, связанных с изменениями температурных воздействий на ОВТД и искомым смещением торцевой части лопатки.

Отмечается, что, несмотря на особенности каждого из вариантов ИЦ, выявленные в процессе анализа, оба варианта могут быть использованы в составе разрабатываемых систем. Однако более предпочтителен с эргономической точки зрения тот вариант, в котором увеличение температуры (θ) и РЗ (y) сопровождается ростом кодов на выходе ИЦ и, напротив, их уменьшение – с уменьшением θ и y .

С помощью полученных аналитических выражений и семейства ФП ОВТД (в предположении использования предложенного метода измерения РЗ) определено семейство ФП ИЦ в виде зависимостей экстремальных значений кода на выходе ИЦ от температуры (θ) и РЗ (y) (в положении РК I) и только температуры (θ) (в положении РК II).

Полученное семейство ФП дает возможность количественной оценки двух составляющих кода, связанных с изменением температуры (ΔC_θ) и искомого параметра (ΔC_y). Показано, что ресурс АЦП в большей степени

расходуется на МФ (температуру), чем на искомый параметр y (РЗ) (ΔC_θ существенно больше ΔC_y). И эта особенность приводит к увеличению приведенной погрешности, связанной с влиянием помех, имеющих случайный характер.

Получено также семейство ФП ИЦ в предположении использования кластерного метода, предусматривающего применение двух ОВТД (ОВТД₁ и ОВТД₂), включенных в индивидуальные ИЦ для каждого из двух датчиков (ИЦ₁ и ИЦ₂). Это зависимости кодов на выходе ИЦ₁ и ИЦ₂ от радиальных и осевых смещений торцов контролируемой лопатки (x, y -координат), а также температуры в положении РК I. Зависимость кода от температуры в положении РК II имеет тот же вид, что в ИЦ, реализующей метод измерения РЗ, – зависимость кода только от температуры.

Кроме того, в предположении использования обоих методов экспериментально получены семейства ФП ИЦ, характер изменений кодов в которых в зависимости от искомых параметров идентичен соответствующим семействам ФП, полученных в результате расчетов.

РАЗДЕЛ 3

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОВТД

Принципы построения систем рассматриваются на уровне структурно-функциональных схем (СФС) и алгоритмов функционирования. Приведено описание СФС, предназначенной для получения и обработки измерительной информации о РЗ (y -координате). Рассматривается возможность использования двух идентичных СФС (аналогичных СФС, ориентированной на РЗ) для получения и обработки информации не только о РЗ (y), но и об ОС (x -координаты). Рассматриваются алгоритмы функционирования систем с включенными в СФС МК, обеспечивающими в реальном времени реализацию методов самокомпенсации температурных воздействий на ОВТД и обнаружения опасных деформаций лопаток. Кроме того, приведено описание алгоритма расчета физических значений РЗ (y) в обоих вариантах системы, выполняемых в ПЭВМ, с учетом температурных воздействий как на контролируруемую, так и на соседние лопатки [21, 22].

3.1. Структурно-функциональные схемы систем измерения

На рис. 3.1 представлена СФС, обеспечивающая получение и обработку измерительной информации о РЗ (y). Изменения РЗ (y) преобразуются в изменения информативного параметра (эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ) ОВТД и далее в изменения цифрового кода АЦП ($C(t)$) в составе ИЦ.

Код ($C(t)$) с выхода ИЦ через устройство ввода-вывода (УВВ) аналоговой и дискретной информации в составе МК с помощью вычислительных

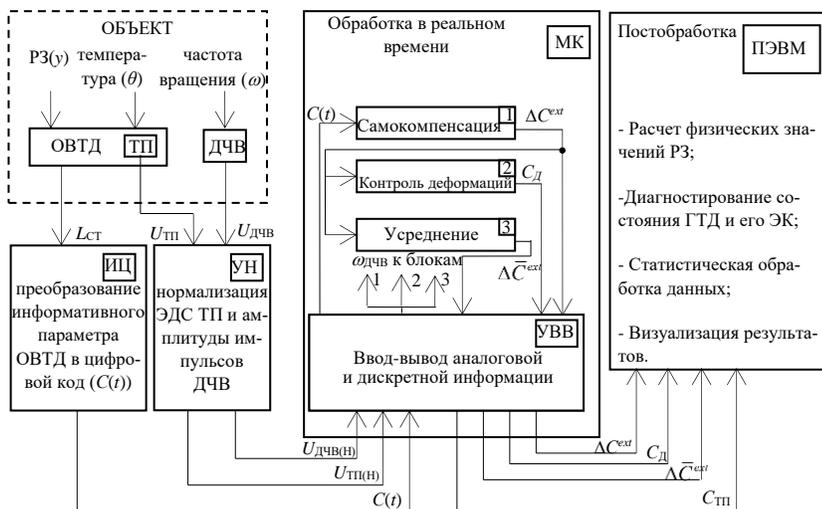


Рис. 3.1. СФС – получение и обработка измерительной информации о РЗ (y)

средств МК обрабатывается в реальном времени. При этом в первую очередь, обеспечивается самокомпенсация температурных воздействий на ОВТД, предусматривающая усреднение кодов межлопаточных промежутков ($\bar{C}_{П}^{ext}$), вычисление разности $\bar{C}_{П}^{ext} - C(t) = \Delta C$ и определение ее экстремального значения ΔC^{ext} (раздел 1.2). Следует отметить, что для выполнения перечисленных операций, связанных с самокомпенсацией (блок 1 МК), равно как для диагностики (блок 2 МК) и усреднения разностных кодов (блок 3 МК), необходима информация о скорости вращения РК. Ее получение обеспечивает ДЧВ промышленного изготовления. После нормализации амплитуды импульсного напряжения с выхода ДЧВ оно поступает на дискретные входы УВВ ($U_{ДЧВ(Н)}$), а в частотном виде ($\omega_{дчв}$) используется во всех представленных в схеме блоках МК (1, 2, 3).

Вместе с тем, необходимо подчеркнуть, что самокомпенсация температурных воздействий на ОВТД не устраняет его чувствительность к температурным воздействиям как на контролируемую, так и соседние лопатки. В разделе 3.2 приводится описание способа уменьшения влияния такого вида

МФ, который предусматривает экспериментальное получение семейства ГХ с учетом рассматриваемого МФ (т.е. получение семейства функций вида $\Delta C^{ext} = f(y, \theta)$), а затем использование семейства ГХ в ПЭВМ для вычисления РЗ (y) по текущим значениям разности кодов ΔC^{ext} и температуры θ . При этом измерение текущих значений температуры в проточной части компрессора производится с помощью ТП, встроенной в ОВТД. Выходное напряжение ТП ($U_{ТП}$) нормализуется (усиливается ($U_{ТП(Н)}$)), а затем преобразуется в цифровой код ($C_{ТП}$) в АЦП в составе УВВ. Обычно код $C_{ТП}$ передается в ПЭВМ, где на основе снятых экспериментально ГХ производится расчет физических значений измеряемых РЗ. Однако, при наличии соответствующих ресурсов, вычисление РЗ может осуществляться и на уровне МК.

Как уже отмечалось, результаты самокомпенсации температурных воздействий в виде разностных кодов ΔC^{ext} используются для контроля опасных деформаций лопаток, информация о которых передается в ПЭВМ (через УВВ) в виде двоичного кода СД (0 – отсутствие нештатных деформаций, 1 – их наличие по каждой из n_l лопаток). И, наконец, разность кодов ΔC^{ext} (по каждой лопатке) усредняется для уменьшения влияния случайных погрешностей. Также через УВВ усредненные значения разности ΔC^{ext} передаются в ПЭВМ для вычисления более достоверных значений РЗ (y -координаты).

На рис. 3.2 представлена структура системы, обеспечивающей получение и обработку измерительной информации о РЗ и ОС РК (координат y и x). Отличительная особенность системы – наличие двух идентичных СФС, представленных на рис. 3.1. При этом каждая из СФС обслуживает один из двух ОВТД в составе кластера (ОВТД₁ включен в СФС₁, ОВТД₂ – в СФС₂), что в процессе независимого функционирования обеих СФС обеспечивает реализацию кластерного метода, описание которого приведено в разделе 1.4.

На рис. 3.2 пунктирными линиями обозначены ОВТД₁ и ОВТД₂, а также другие технические средства в составе системы (ТП, встроенные в ОВТД, ДЧВ, УН, МК и его УВВ – по одному экземпляру в каждой из СФС). Однако для решения основной задачи системы нет необходимости в дублировании

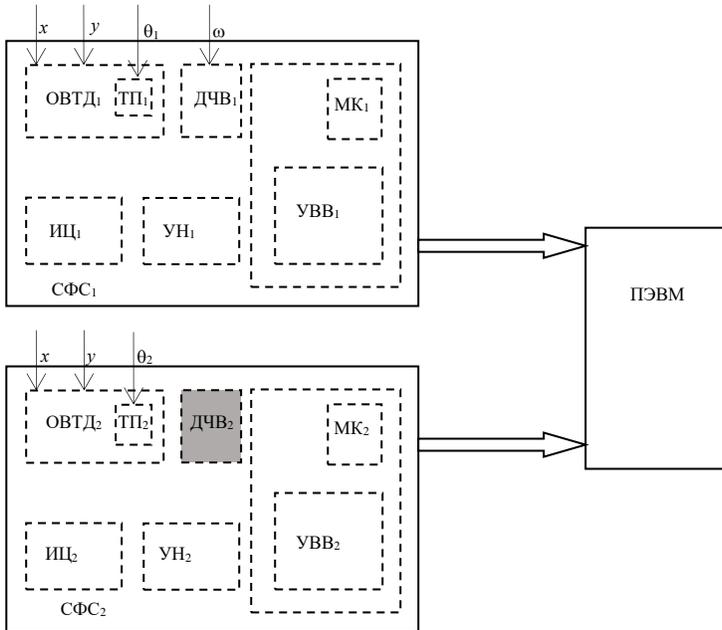


Рис. 3.2. Структура системы получения и обработки измерительной информации о РЗ и ОС (y, x -координаты)

измерений частоты вращения РК, а потому сигналы ДЧВ₁ нормализуются не только УН₁, но и УН₂, поступаая далее на обработку в МК₂¹¹.

Следует также подчеркнуть, что функционирования технических средств в СФС₁ и сохранившихся в СФС₂ полностью соответствуют описанию функционирования СФС, представленной на рис. 3.1.

Исключением является вычисление физических значений искомых РЗ и ОС (y, x -координат). Действительно, в соответствии с предложенным в разделе 1.4 кластерным методом для определения РЗ (y) и ОС (x) решается система уравнений (1.4). Однако с целью учета температурных воздействий на

¹¹ Поэтому на рис. 3.2 удаление ДЧВ₂ из состава технических средств СФС₂ отмечено тонированием. Кроме того, с учетом сдвига ОВД₂ относительно ОВД₁ по координатной оси Z (раздел 1.4) для привязки результатов измерения к конкретной лопатке необходима идентификация номеров лопаток, которая обычно производится в ПЭВМ.

контролируемую и соседние лопатки по аналогии с расчетами физических значений РЗ (рисунок 3.1) система уравнений (1.4) представлена в виде

$$\begin{cases} \Delta C_1^{\text{ext}} = f_1(x, y, \theta); \\ \Delta C_2^{\text{ext}} = f_2(x, y, \theta), \end{cases} \quad (3.1)$$

где и ΔC_1^{ext} , ΔC_2^{ext} – разностные коды, полученные в МК₁ и МК₂ соответственно, θ - температура в проточной части компрессора, преобразуемая ТП₁ и ТП₂, УН₁ и УН₂ в напряжения и соответствующие коды в УВВ₁ (МК₁) и УВВ₂ (МК₂), а также в физические значения θ_1 и θ_2 и их среднее значение θ в ПЭВМ.

Остальные функции, перечисленные на условном изображении ПЭВМ рис. 3.1 (после замены второй позиции на «Расчет физических значений РЗ и ОС»), распространяется и на ПЭВМ в структуре системы рис. 3.2.

3.2. Алгоритмы функционирования систем

Как было показано в разделе 3.1, в обоих вариантах систем, предназначенных для получения информации о РЗ (y), а также о РЗ и ОС (y , x -координатах), кроме ПЭВМ используются вычислительные средства МК, обеспечивающие самокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД, обнаружение опасных состояний лопаток и усреднение разностных кодов для уменьшения случайных погрешностей. Для реализации системы, ориентированной только на РЗ достаточно одного МК. При необходимости получения информации о РЗ и ОС (согласно разделам 1.4 и 3.1) используется пара идентичных МК (МК₁ и МК₂) с обязательным выполнением в каждом МК выше перечисленных функций и общей синхронизацией процессов обработки кодов по сигналам одного ДЧВ₁ с целью однозначной нумерации лопаток РК. Если решается задача получения информации о большем числе координат смещений торца лопатки, то возрастает число ОВТД в кластере и соответствующее число идентичных МК.

Таким образом, при реализации кластерных методов в рассматриваемом классе систем может быть использован универсальный модуль, представленный техническими средствами – ИЦ, УН и МК (рис. 3.1, 3.2) и его (МК) программным обеспечением, реализующим алгоритмы

функционирования, связанные с самокомпенсацией и усреднением, обнаружением опасных деформаций лопаток.

С учетом того, что оба варианта систем (рис. 3.1 и 3.2) построены на основе универсального модуля, в настоящем разделе основное внимание уделено алгоритмам функционирования МК. Что касается алгоритмов расчета физических значений искомым параметров (РЗ, а также ОС), то они идентичны известным по источникам [1-3] и поэтому здесь (в разделе 3.2) дано лишь краткое описание таких алгоритмов, в котором отмечается основная отличительная особенность, связанная с коррекцией температурных воздействий на контролируемые и соседние лопатки.

Алгоритм полного цикла функционирования МК. Рассматриваемый алгоритм предусматривает выполнение функций, соответствующих трем группам операций связанных с самокомпенсацией, обнаружением опасных деформаций лопаток и усреднением.

Перечисленные группы операций выполняются циклически с разделением времени для каждой контролируемой лопатки и встроены в тело общего цикла, ограниченного количеством лопаток РК и числом периодов вращения для выполнения усреднений. При этом заданное число полных периодов вращения РК составляет длительность цикла измерения.

Блок-схема операций полного цикла с усреднением на нескольких (q_0) периодах вращения РК представлена на рис. 3.3.

Работа алгоритма начинается с процедуры *Hist* (блок 2), в результате исполнения которой на первом по счету периоде РК вычисляется усредненный код межлопаточных промежутков \bar{C}_{II} , а также определяется текущая скорость вращения РК N_0 (блок 3).

Основу цикла (блоки 4-10) составляет процедура *Extreme*, обеспечивающая выполнение всех основных операций по обработке кодов для одной контролируемой лопатки (самокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД, оценку опасных деформаций лопаток и усреднение кодов). Циклическость обработки кодов всех лопаток РК ($n = 1, \dots, n_n$) в пределах периода вращения обеспечивается операторами в блоках 7, 8.

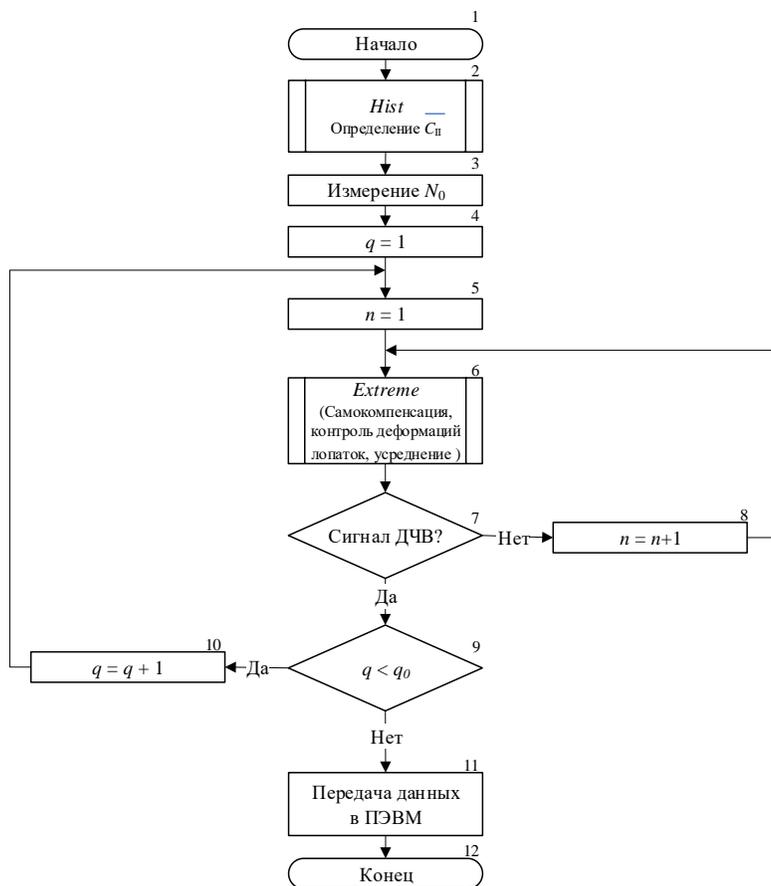


Рис. 3.3. Блок-схема алгоритма полного цикла с усреднением на нескольких периодах вращения РК

В ходе выполнения процедуры *Extreme* на каждом текущем периоде вращения РК также происходит пересчет и обновление кода \bar{C}_{II} . Окончание цикла контролируется условным оператором 9 по заданному числу q_0 периодов вращения РК, при достижении которых результаты передаются в ПЭВМ (блок 11) для дальнейшей обработки.

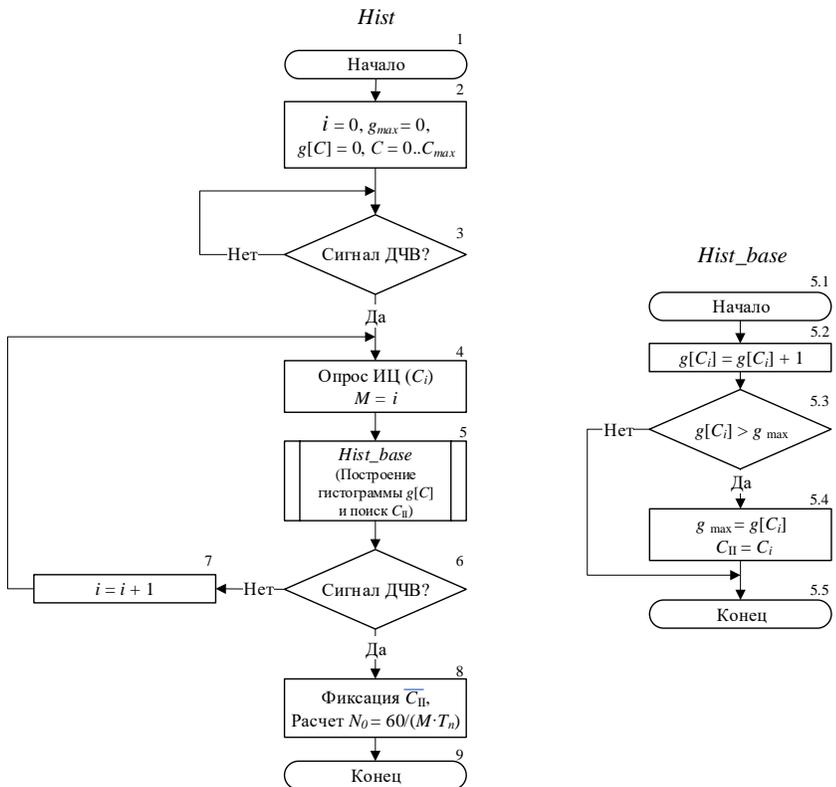


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритма *Hist* для расчета усредненного экстремального кода межлопаточных промежутков \bar{C}_{II}

Алгоритм определения усредненного экстремального значения кода в межлопаточных промежутках (Hist). Алгоритм *Hist* обеспечивает получение усредненной оценки экстремальных значений кодов в межлопаточных промежутках \bar{C}_{II} в конце каждого периода вращения РК. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.4.

Работа алгоритма начинается с инициализации входных переменных и исходного обнуления массива гистограммы $g[C]$ (блок 2). Процесс накопления данных производится в течение одного полного периода вращения РК

(блоки 4, 5), начало и окончание которого отслеживается логическими операторами появления сигнала ДЧВ при прохождении датчика специальной меткой, расположенной на валу компрессора (блоки 3 и 6 соответственно).

В процессе работы ИЦ с периодом T_{Π} осуществляется фиксация очередного отсчета кода C_i и запоминание суммарного числа отсчетов M за период вращения РК (блок 4). Код C_i обрабатывается в процедуре *Hist_base* (блок 5), которая, собственно, и обеспечивает формирование массива гистограммы $g[C]$ (блок 5.2) с одновременным определением величины глобального экстремума g_{max} (блоки 5.3, 5.4) и соответствующего ему кода C_{Π} (блок 5.4).

По окончании периода вращения РК в блоке 8 фиксируется усредненное экстремальное значения кода для межлопаточных промежутков \bar{C}_{Π} и рассчитывается скорость вращения РК (N_0).

Алгоритм определения экстремальных значений разностных кодов (Extreme). В соответствии с методом, изложенным в разделе 1.2.2 производится вычисление разности усредненных на предыдущем периоде вращения РК кодов межлопаточных промежутков \bar{C}_{Π} и изменяющихся во времени кодов ИЦ $C(t)$ ($\Delta C = \bar{C}_{\Pi} - C(t)$), а затем поиск простым перебором экстремальных значений разности ΔC^{ext} . При этом поиск ΔC^{ext} происходит во временном интервале, ограниченном пороговым значением разностного кода ΔC_{Π} и так называемым адаптивным порогом ΔC_{α} (рис. 1.5).

Наиболее полному описанию алгоритма *Extreme* предшествует краткое описание процедуры определения (поиска) ΔC^{ext} (*Detect*), представленной на рис. 3.5.

Условный оператор 2 в сочетании с блоком 3 реализуют функцию определения экстремума ΔC^{ext} , а также вычисления адаптивного порога ΔC_{α} . Условный оператор 4 выполняет функцию компаратора, по срабатыванию которого фиксируется факт достижения ΔC^{ext} (выход 2 «Да»).

Блок-схема полного алгоритма *Extrem* представлена на рис. 3.6. Входными параметрами алгоритма являются порядковый номер лопатки (n),

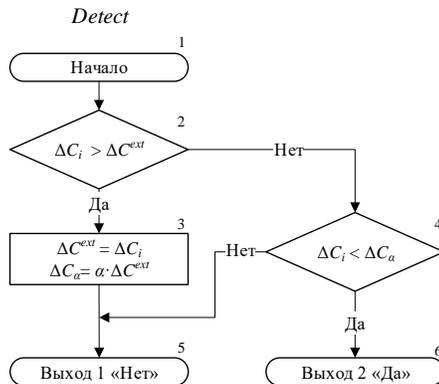


Рис. 3.5. - Блок-схема алгоритм определения ΔC^{ext}

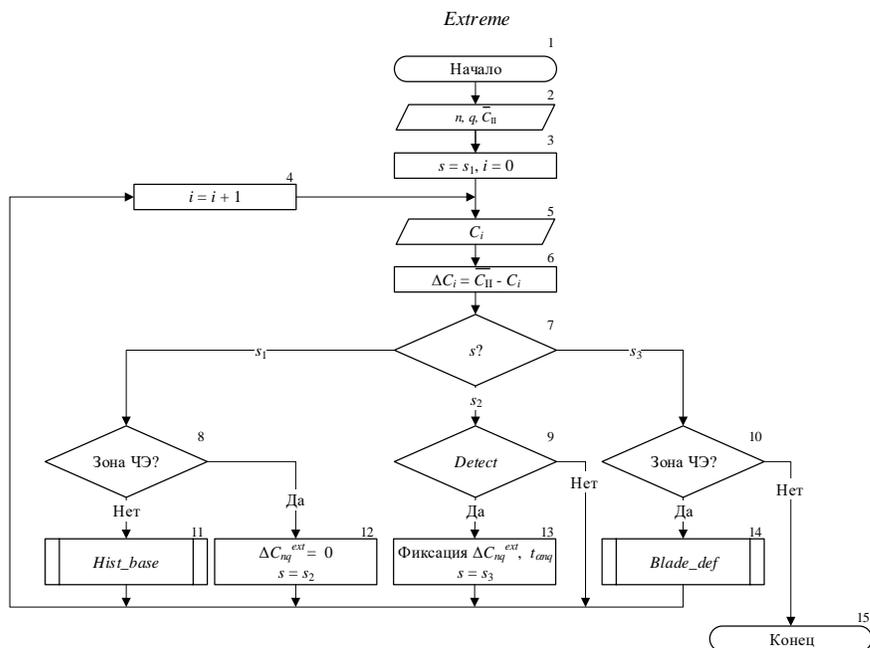
число накопленных частичных сумм для усреднения на нескольких периодах вращения (q) и значение кода межлопаточных промежутков, которое было определено на предыдущем периоде вращения РК (\bar{C}_{II}).

Работа алгоритма основана на чередовании фиксированных состояний, описание которых для лопатки под номером l приведено в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Описание состояний алгоритма (s)

Состояние	Описание состояний	Временные интервалы
s_1	Код отсчета в зоне $\Delta C < \Delta C_{п.}$. Ожидание появления новой лопатки в зоне ЧЭ ОВТД	$t < t_{11}; t > t_{12}$
s_2	Ожидание момента определения экстремума ΔC^{ext} по адаптивному порогу	$t_{11} < t < t_{\alpha}$
s_3	Код отсчета в зоне $\Delta C > \Delta C_{п.}$. Ожидание выхода лопатки из зоны ЧЭ ОВТД	$t_{\alpha} < t < t_{12}$

Инициализация алгоритма осуществляется в блоке 3 и предполагает сброс в исходное состояние $s = s_1$, а также установку начальных значений для нумерации отсчетов, лопаток и вспомогательных переменных. При поступлении очередного кода C_i (блок 5), в соответствии с реализуемым

Рис. 3.6. Блок-схема алгоритма *Extreme*

методом, в блоке 6 производится вычисление разностного кода ΔC_i . Дальнейший процесс обработки происходит циклически с инкрементом нумерации отсчетов в блоке 4. Блок 7 выполняет условную операцию переключателя состояний алгоритма.

В состоянии s_1 , которое соответствует прохождению межлопаточного промежутка, выполняется базовая операция *Hist_base*, и на текущем периоде вращения РК производится построение гистограммы $g[C]$ и поиск экстремального кода межлопаточных промежутка \bar{C}_{II} (блок-схема *Hist_base* приведена на рис. 3.4). При появлении в зоне чувствительности ОВТД новой лопатки (условие 8, «Да»), в блоке 12 выполняется начальный сброс экстремального кода ($\Delta C_{nq}^{ext} = 0$), а алгоритм переводится в состояние s_2 . При этом запускается процедура *Detect* (условие 9, рис. 3.5), осуществляющая поиск экстремального значения кода ΔC_{nq}^{ext} следующей лопатки.

После завершения поиска ΔC_{nq}^{ext} , в блоке 13 фиксируются момент времени наступления этого события t_{anq} . Алгоритм переводится в состояние s_3 и запускается процедура обработки кодов *Blade_def* (блок 14), которая анализирует полученную измерительную информацию на предмет возникновения опасных деформаций лопаток и усредняет экстремальные значения разностных кодов для уменьшения случайной погрешности измерения. Операции по обработке кодов завершаются до наступления очередного межлопаточного промежутка (условие 10 «Нет»). Алгоритм возвращается в состояние s_1 , а управление вновь переходит к процедуре организации полного цикла (рис. 3.3).

Алгоритм обнаружения опасных деформаций лопаток и усреднение кодов (Blade_def). Блок-схема алгоритма процедуры *Blade_def* представлена на рис. 3.7. Входными параметрами процедуры являются номер лопатки (n), число полных периодов вращения РК, прошедших с момента начала цикла (q) и допустимая величина деформации лопаток ε_0 (раздел 1.3). Работа алгоритма предполагает последовательное выполнение двух этапов - на первом контролируются опасные деформации лопаток, а на втором осуществляется накопление и усреднение экстремальных значений разностных кодов ΔC_{nq}^{ext} и моментов их появления t_{anq} .

На первом этапе, для текущего периода вращения РК с порядковым номером q и контролируемой лопатки с номером n , вычисляется временной интервал смещения огибающей разностного кода Δt_{nq} , который затем нормируется по периоду вращения РК T_{PK} (блок 3). При этом используется усредненное значение \bar{t}_{avn} , вычисленное в предыдущем цикле. Если нормированное значение временного интервала смещения огибающей разностного кода превышает допустимое значение ε_0 (проверка условия $|\delta t_{nq}| \leq \varepsilon_0$ осуществляется в блоке 4), то фиксируется опасная деформация лопатки (блок 5), соответствующая информация передается в ПЭВМ верхнего уровня для диагностики объекта.

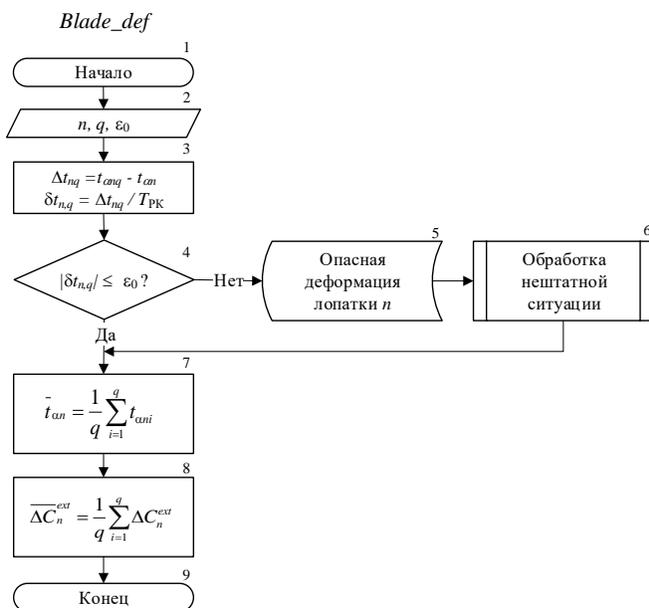


Рис. 3.7. Алгоритм обнаружения опасных деформаций лопаток и усреднения

В блоке 6 выполняется расчет среднего значения $\bar{t}_{ан}$ моментов времени $t_{анq}$. Результат расчета будет использован для обнаружения опасных состояний лопаток в следующем цикле.

Блок 7 обеспечивает усреднение разностных кодов на заданном числе периодов вращения РК для уменьшения величины случайных погрешностей.

Алгоритмы вычисления физических значений искомых координат. Как уже отмечалось, самокомпенсация температурных воздействий на ОВД не устраняет влияние на результат преобразования РЗ и ОС температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки. Описание способа уменьшения такого влияния приведено в работе [23]. При этом в процессе градуировки используются не одна лопатка, а фрагмент РК с несколькими лопатками, аналогичных тем, что применяются в реальном компрессоре (обычно достаточно фрагмента из трех лопаток, установленных с шагом, соответствующим шагу лопаток на реальном РК).

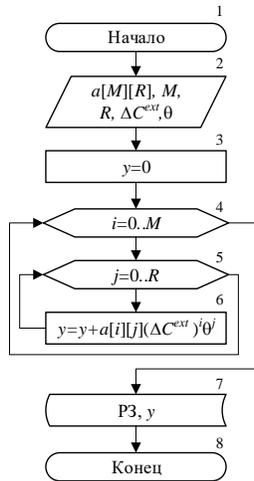


Рис. 3.8. Блок-схема алгоритма вычисления физических значений P3

На рис. 3.8 представлена блок-схема алгоритма вычисления физических значений P3, учитывающего температурные воздействия на контролируемую и на соседние лопатки РК. Предполагается, что ГХ измерительного канала с ОВТД в виде двумерного массива, содержащего разностный код (ΔC^{ext}) для заданных значений P3 (y) и температуры (θ), была аппроксимирована и представлена в виде полиномиальной функции двух переменных:

$$y = \sum_{m=0}^M \sum_{r=0}^R a_{mr} (\Delta C^{ext})^m \theta^r, \quad (3.2)$$

где a_{mr} – коэффициенты полинома¹², а M и R – соответственно степени по первому и второму параметру, которые наряду с ΔC^{ext} и θ являются исходными данными для алгоритма.

Расчет физических значений P3 с учетом температурных воздействий на контролируемую и соседнюю лопатки в соответствии с выражением (3.2)

¹² Для вычисления коэффициентов полинома используется метод наименьших квадратов (МНК), который может быть реализован как в стандартных пакетах прикладным программ, так и в специально разработанном ПО для проведения градуировки измерительный каналов с ОВТД [1].

осуществляется в цикле (4-6). Вычисленное значение y сохраняется в памяти системы (блок 7), может быть отображено на экране монитора и доступно для пользователя.

Следует отметить, что рассмотренный на рис. 3.8 алгоритм вычисления РЗ может быть расширен и на задачи, связанные с измерением РЗ на нескольких РК в условиях действия ОС, как это было показано в методе, описание которого приведено в разделе 1.4. Тогда для всех колес, кроме первого, ОС РК будет таким же мешающим фактором, как и температура θ . В этом случае экспериментально полученные семейства ГХ могут быть аппроксимированы полиномиальными функциями трех переменных и по аналогии с (3.2) представлены в виде:

$$y = \sum_{m=0}^M \sum_{r=0}^R \sum_{p=0}^P a_{mrp} (\Delta C^{ext})^m \theta^r x^p, \quad (3.3)$$

где P – степень полинома по третьему параметру (ОС). При этом в блок-схеме алгоритма рис. 3.8 после блока 5 добавится еще один вложенный цикл вычисления по P .

Что же касается определения физических значений не только радиальных (РЗ (y)), но и осевых смещений торцов лопаток (ОС (x)), то подобные алгоритмы, в том числе и с учетом температурной коррекции, подробно рассмотрены в монографиях [2, 3]. Причем в [3] приводится вариант алгоритма, который обеспечивает получение информации о РЗ в расширенном диапазоне действия ОС, когда имеет место немонотонность семейств ГХ.

Заклучение к разделу 3

Разработаны принципы построения систем на уровне СФС и алгоритмов их функционирования. Приведено описание двух вариантов систем. Первый вариант ориентирован на получение измерительной информации о РЗ (y), и в составе его технических средств содержится ОВТД, включенный в ИЦ с АЦП на выходе, встроенную в ОВТД ТП, ДЧВ, УН выходных параметров ТП и ДЧВ, а также МК с собственным УВВ. МК позволяет вести обработку данных, полученных с ОВТД, ТП и ДЧВ, которая происходит в реальном времени в соответствии с реализуемыми в системе методами и сводится к самокомпенсации температурных воздействий на ОВТД,

обнаружению опасных деформаций лопаток и усреднению разностных кодов, полученных в МК для уменьшения случайных погрешностей. Расчет физических значений РЗ производится на верхнем уровне системы с использованием коррекции температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки (по данным ТП, встроенной в ОВТД).

Второй вариант системы предназначен для получения измерительной информации о РЗ и ОС (y , x -координатах) и в составе своих технических средств содержит две идентичных СФС, каждую из которых (по аналогии с первым вариантом) обслуживает один из двух ОВТД в составе кластера. Входящие в состав СФС МК работают независимо друг от друга, выполняя аналогичные функции. Разностные коды с выходов МК и результаты преобразования температур, полученные с помощью встроенных в ОВТД ТП, используются в алгоритмах вычисления искомых РЗ и ОС (y , x -координат) с коррекцией температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки. Единственной отличительной особенностью второго варианта системы является наличие одного ДЧВ (ДЧВ₁), что связано с необходимостью синхронизации выходных данных, полученных в результате обработки МК в составе каждой из двух СФС.

Разработан алгоритм полного цикла функционирования МК, обеспечивающий выполнение трех групп операций, связанных с самокомпенсацией, обнаружением опасных деформаций лопаток и усреднением разностных кодов. Все операции синхронизированы с периодом вращения РК и выполняются циклически с разделением времени для каждой контролируемой лопатки. В пределах этого алгоритма конкретизированы в виде блок-схем процедуры определения усредненного экстремального значения кода в межлопаточных промежутках, поиска экстремальных значений разностных кодов, обнаружения опасных деформаций лопаток и усреднения кодов. Разработанные алгоритмы МК ориентированы на функционирование в реальном времени и обеспечивают значительную экономию вычислительных ресурсов МК за счет хранения и обработки лишь информативных фрагментов кодов с применением специальных приемов, позволяющих избежать громоздких математических вычислений.

Для уменьшения влияния на вычисляемые в ПЭВМ физические значения РЗ и ОС температурных воздействий на контролируемую и соседние

лопатки предусмотрено экспериментальное получение семейств ГХ, связывающих текущие значения разностных кодов с искомыми параметрами и температурой в проточной части компрессора. При этом в процессе градуировки в термокамере используется фрагмент РК, содержащий как минимум три идентичных лопатки, установленных с тем же шагом, что и на реальном РК. Разработана блок-схема алгоритма вычисления физических значений РЗ в предположении, что ГХ аппроксимирована и представлена в виде полиномиальной функции двух переменных. Показано, что алгоритм может быть использован для получения информации о РЗ на нескольких РК, расположенных на одном валу, при наличии ОС и температурных воздействий.

РАЗДЕЛ 4

ВЛИЯНИЕ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ

В предыдущих разделах рассматривались семейства ФП ОВТД и ИЦ, структура и алгоритмы функционирования систем, которые в основном ориентированы на реализацию методов измерения и обработки информации о РЗ (y -координаты). Однако при этом не учитывались влияния соседних лопаток и температурных воздействий как на соседние, так и на контролируемые лопатки. В настоящем разделе эти влияния рассматриваются как МФ, которым дается соответствующая количественная оценка. Кроме того, при изменении РЗ дополнительным МФ могут быть ОС РК, результаты количественной оценки которых также приводятся в настоящем разделе.

Необходимо подчеркнуть, что исследования влияния каждого из перечисленных МФ производится в настоящем разделе по единой методике, предусматривающей три этапа:

- на первом этапе определяются изменения информативного параметра ОВТД, связанные с исследуемым МФ, в зависимости от РЗ (y);
- на втором этапе результаты, полученные на первом, используются для количественной оценки влияния МФ на экстремальные значения кодов на выходе ИЦ (в положениях РК I и РК II) в зависимости от РЗ (y);
- на третьем этапе дается количественная оценка влияния исследуемого МФ на разность экстремальных значений кодов, которая представлена в виде так называемой ФВ, характеризующей возможные погрешности (при вычислении разности экстремальных значений кодов (выражение (2.12)) предполагается идентичность

всех межлопаточных промежутков и лопаток (соответственно), а также идеальная точность определения экстремальных значений кодов, что вполне допустимо в исследованиях влияния МФ), и это гарантирует совпадение полученных результатов с результатами вычисления разности усредненных экстремальных значений кодов межлопаточных промежутков и текущих значений кодов с последующим определением экстремального значения разности (в соответствии с методами обработки и реализующими их алгоритмами, изложенными в разделах 1.2.2 и 3.2) [23, 24-26].

4.1. Влияние соседних лопаток

С учетом влияния соседних лопаток выражения (1.1) и (1.2) примут вид:

$$L_{СТ(I)}^{ex} = L_0 + \Delta L_\theta - \Delta L_y - \Delta L_{СЛ(I)}, \quad (4.1)$$

$$L_{СТ(II)}^{ex} = L_0 + \Delta L_\theta - \Delta L_{СЛ(II)}, \quad (4.2)$$

где $\Delta L_{СЛ(I)}$ и $\Delta L_{СЛ(II)}$ – изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ, связанные с влиянием соседних лопаток 2 и n_l (положение РК I), а также 1 и 2 (положение РК II) соответственно (рис. 1.1). При этом величина $\Delta L_{СЛ(II)}$ намного больше $\Delta L_{СЛ(I)}$, поскольку ЧЭ ОВТД расположен на расстоянии $z_{ш} / 2$ от соседних лопаток в положении РК II по сравнению с положением РК I.

Следует отметить, что выражения (4.1) и (4.2) дают наглядное представление о влиянии соседних лопаток на эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ ($L_{СТ}^{ex}$), но при фиксированном значении РЗ (y) и на качественном уровне. Вместе с тем $L_{СТ(I)}^{ex}$ и $L_{СТ(II)}^{ex}$ являются функциями РЗ (y) и температуры (θ). В разделе 2.1 (рис. 2.4) они представлены как семейство ФП, причем при нормальной температуре (20 °С) ФП получена с помощью модели ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки в виде зависимости $L_{ЧЭ}^{ex}(y)$ (рис. 2.3), пересчитанной в индуктивность первичной обмотки СТ. Кроме того следует также отметить, что в нормальных температурных условиях (20 °С), когда в выражениях (4.1) и (4.2) $\Delta L_\theta = 0$, а величина ΔL_y , зависящая от y (т.е.

$\Delta L_y(y)$), определена на модели, величины слагаемых $\Delta L_{\text{СЛ(I)}}$ и $\Delta L_{\text{СЛ(II)}}$, также зависящих от y , остаются неизвестными.

Поэтому решение задачи о количественной оценке влияния соседних лопаток на выходные значения кодов МК в составе системы измерения РЗ осуществляется в соответствии с общей методикой, изложенной во вводной части настоящего раздела и предусматривает несколько этапов: на первом этапе определяются функции $\Delta L_{\text{СЛ(I)}}(y)$ и $\Delta L_{\text{СЛ(II)}}(y)$; на втором - данные, полученные на первом этапе, используются в анализе ИЦ для количественной оценки влияния соседних лопаток на экстремальные значения кодов на выходе ИЦ (функций $C_I(y)$ и $C_{II}(y)$ – ФП ИЦ). И, наконец, на третьем этапе дается количественная оценка влияния соседних лопаток на разность экстремальных значений кодов, которая представлена в виде ФВ соседних лопаток, результаты исследования которой приводятся в заключительной части раздела.

Определение функций $\Delta L_{\text{СЛ(I)}}(y)$ и $\Delta L_{\text{СЛ(II)}}(y)$. В работе [3] приведены описания модели ЭМВ взаимодействия ЧЭ ОБТД не только с контролируемой, но и с соседними лопатками сложной формы, применяемыми в турбинах. Представляется очевидной возможность применения этой модели для исследования влияния соседних лопаток в компрессоре после замены турбинных лопаток теми, что применяются в компрессоре с заменой соответствующих исходных данных (такие данные были приведены выше в разделе 2.1).

На рис. 4.1 сплошными линиями представлены ранее полученные семейства ФП ОБТД ($L_{\text{СТ(I)}}^{\text{ex}}(y)$ и $L_{\text{СТ(II)}}^{\text{ex}}(y)$) без учета влияния соседних лопаток (рис. 2.4). Пунктирными линиями обозначены те же семейства ФП, но полученные с учетом влияния соседних лопаток.

Результаты вычислительных экспериментов с учетом влияния соседних лопаток показали незначительное отклонение функции (y) при выбранном шаге установки лопаток ($z_{\text{ш}} = 24$ мм). В масштабной сетке рис. 4.1, a они практически незаметны, а потому в более крупном масштабе функция

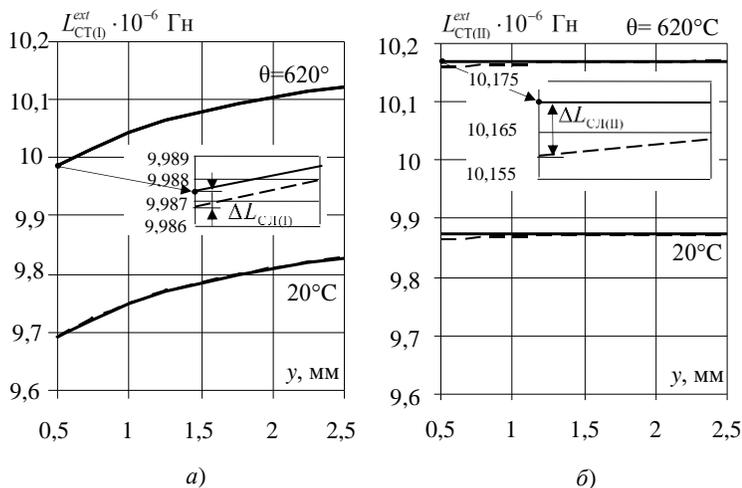


Рис. 4.1. Семейство ФП $L_{CT(II)}^{ext}(y, \theta)$ (а) и $L_{CT(II)}^{ext}(\theta)$ (б)

(без учета соседних лопаток – сплошные линии и с их учетом – пунктир)

$L_{CT(II)}^{ext}(y)$ (с учетом соседних лопаток в окрестности $y = 0,5$ мм) вынесена на «аппликацию».

Как и ожидалось, соседние лопатки вызывают уменьшение индуктивности $L_{CT(II)}^{ext}$ ($\Delta L_{СЛ(II)}$ – величина отрицательная). Такой же характер влияния наблюдается и в отношении $L_{CT(II)}^{ext}$, однако ее изменения ($\Delta L_{СЛ(II)}$) возрастают в несколько раз по величине и, что особенно важно, $L_{CT(II)}^{ext}$ теряет независимость от y , монотонно возрастая с увеличением y (рис. 4.1, б).

Функции $\Delta L_{СЛ(II)}(y)$ и $\Delta L_{СЛ(II)}(y)$ изображены на рис. 4.2. Величина $\Delta L_{СЛ}$ монотонно возрастает с уменьшением y и шага установки лопаток z_{II} .

Влияние соседних лопаток на выходные коды ИЦ. Для таких исследований проводится анализ ИЦ (рис. 2.8) с использованием результатов, полученных на первом этапе (функции $\Delta L_{СЛ(II)}(y)$ и $\Delta L_{СЛ(II)}(y)$).

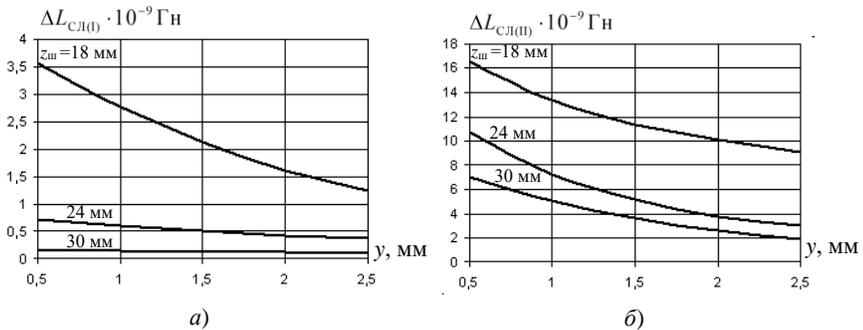


Рис. 4.2. Изменения индуктивности первичной обмотки СТ, связанные с влиянием соседних лопаток (функции $\Delta L_{\text{Сл(II)}}(y)$ (а) и $\Delta L_{\text{Сл(II)}}(y)$ (б))

Полагая, что в соответствии с разделом 2.2 $L_1 = L_{\text{И}} = L_0 - L_{\text{д}}$, а $L_2 = L_{\text{СТ(II)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_{\text{Ф}} - \Delta L_y - \Delta L_{\text{Сл(II)}}$ в положении РК I, после ряда преобразований, аналогичных приведенным в указанном разделе, напряжение на выходах ПТН₁ и ПТН₂ примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= ER\Delta t \left(\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} \right) = \\ &= E \left(\frac{\Delta L_0}{L_0} + \frac{L_{\text{д}}}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{Сл(II)}}}{L_0} \right) \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{L_{\text{д}}}{L_0} \right)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta L_0}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{Сл(II)}}}{L_0} \right)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

(предполагается, что $R \frac{\Delta t}{L_0} = 1$).

Если в знаменателях дробных множителей в выражении (4.3) пренебречь слагаемыми $\frac{\Delta L_0}{L_0}$, $\frac{L_{\text{д}}}{L_0}$, $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ и $\frac{\Delta L_{\text{Сл(II)}}}{L_0}$, то код на выходе АЦП в положении РК I:

$$C_1^* \approx K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_0}{L_0} + \frac{L_d}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ(I)}}}{L_0} \right). \quad (4.4)$$

В положении РК II $L_1 = L_{II} = L_0 - L_d$, а $L_2 = L_{\text{СТ(II)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_0 - \Delta L_{\text{СЛ(II)}}$ и разностное напряжение

$$\Delta U_{II} = E \left(\frac{\Delta L_0}{L_0} + \frac{L_d}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ(II)}}}{L_0} \right) \cdot \frac{1}{1 - \frac{L_d}{L_0}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta L_0}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ(II)}}}{L_0} \right)}. \quad (4.5)$$

Тогда, пренебрегая в знаменателе дробных множителей выражения (4.5) слагаемыми $\frac{\Delta L_0}{L_0}$, $\frac{L_d}{L_0}$, $\frac{\Delta L_{\text{СЛ(II)}}}{L_0}$, код на выходе ИЦ (АЦП) в положении РК II можно записать в виде:

$$C_{II}^* \approx K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_0}{L_0} + \frac{L_d}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ(II)}}}{L_0} \right). \quad (4.6)$$

На рис. 4.3 (по аналогии с рис. 4.1) сплошными линиями представлено семейство ФП ИЦ в виде зависимостей $C_I(y, \theta)$ и $C_{II}(y, \theta)$, полученное без учета влияния соседних лопаток (раздел 2.2, рис. 2.10). Зависимости $C_1^*(y, \theta)$ и $C_{II}^*(y, \theta)$, вычисленные по формулам (4.4) и (4.6) с учетом влияния соседних лопаток, представлены на рис. 4.3 пунктирными линиями. Там же показаны разности кодов $\Delta C_{\text{СЛ(I)}} = C_I - C_1^*$ и $\Delta C_{\text{СЛ(II)}} = C_{II} - C_{II}^*$, характеризующие влияние соседних лопаток в положениях РК I и II.

Как и ожидалось, характер зависимостей ФП ОБТД и ИЦ, представленных на рис. 4.1 и 4.3 аналогичен. Аналогичны и соотношения разностных значений индуктивностей и кодов в положениях РК I и II, равно как и характер их изменений от y (рис. 4.2 и 4.4).

Функции влияния соседних лопаток на разность кодов C_{II}^ и C_1^* . Разность экстремальных значений кодов:*

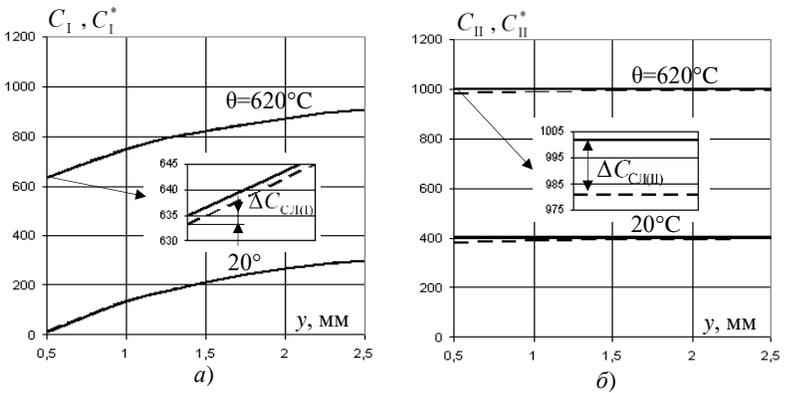


Рис. 4.3. Семейства ФП ИЦ: $C_I(y, \theta)$ (а), $C_{II}(\theta)$ (б) без учета влияния соседних лопаток (сплошные линии), $C_I^*(y, \theta)$ (а), $C_{II}^*(\theta, y)$ (б) – с учетом влияния соседних лопаток (пунктирные линии)

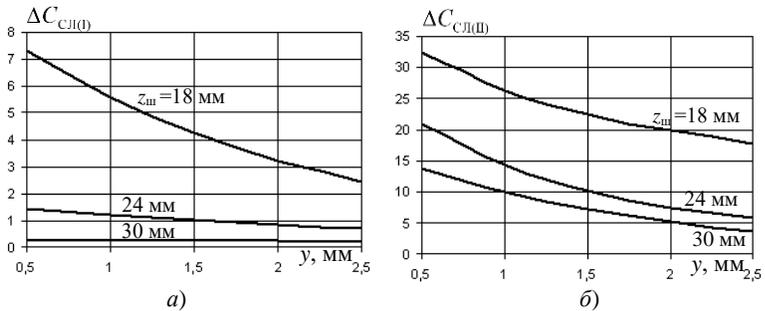


Рис. 4.4. Изменения кодов на выходе ИЦ, связанные с влиянием соседних лопаток ($\Delta C_{СЛ(I)}(y)$ и $\Delta C_{СЛ(II)}(y)$)

$$\Delta C^* = C_{II}^* - C_I^*, \quad (4.7)$$

где C_{II}^* и C_I^* определяются выражениями (4.6) и (4.4) соответственно, а с учетом введенных в разделе 2.2 и на рис. 2.9, а обозначений составляющих (ΔC_θ , C_d , ΔC_y) могут быть представлены в виде

$$C_I^* = \Delta C_\theta + C_d - \Delta C_y - \Delta C_{\text{СЛ(I)}}, \quad (4.8)$$

$$C_{II}^* = \Delta C_\theta + C_d - \Delta C_{\text{СЛ(II)}}. \quad (4.9)$$

Тогда после подстановки (4.8) и (4.9) в выражение (4.7) разность кодов ΔC^* примет вид

$$\Delta C^* = \Delta C_y + \Delta C_{\text{СЛ(I)}} - \Delta C_{\text{СЛ(II)}}. \quad (4.10)$$

Представляется очевидным, что ФВ соседних лопаток, которая характеризует возможные погрешности, можно представить выражением

$$\delta C_{\text{СЛ}} = \frac{\Delta C_{\text{СЛ(I)}} - \Delta C_{\text{СЛ(II)}}}{\Delta C_{y,\max}} \cdot 100\%, \quad (4.11)$$

где $\Delta C_{y,\max}$ – максимально возможное изменение кода в заданном диапазоне изменений РЗ (y -координаты).

Из выражения (4.11) можно получить ФВ соседних лопаток как в положении РК I

$$\delta C_{\text{СЛ(I)}} = \frac{\Delta C_{\text{СЛ(I)}}}{\Delta C_{y,\max}} \cdot 100\%, \quad (4.12)$$

так и в положении РК II (без учета знака « - »)

$$\delta C_{\text{СЛ(II)}} = \frac{\Delta C_{\text{СЛ(II)}}}{\Delta C_{y,\max}} \cdot 100\%, \quad (4.13)$$

На рис. 4.5, *a* представлено семейство ФВ $\delta C_{\text{СЛ}}(y)$ при трех значениях шага $z_{\text{ш}}$ – 18, 24 и 30 мм и с учетом суммарного влияния соседних лопаток в обоих положениях РК (4.11). При $z_{\text{ш}} = 24$ мм максимальное значение $\delta C_{\text{СЛ}}$ составляет около 7,4%. Оно возрастает до 9,6% при $z_{\text{ш}} = 18$ мм и снижается до 5,1% при $z_{\text{ш}} = 30$ мм.

На рис. 4.5, *б*, *в* представлены ФВ при тех же значениях шага $z_{\text{ш}}$, но вычисленные по отдельности – только для соседних лопаток в положении РК I ($\delta C_{\text{СЛ(I)}}(y)$) и только для соседних лопаток в положении РК II ($\delta C_{\text{СЛ(II)}}(y)$).

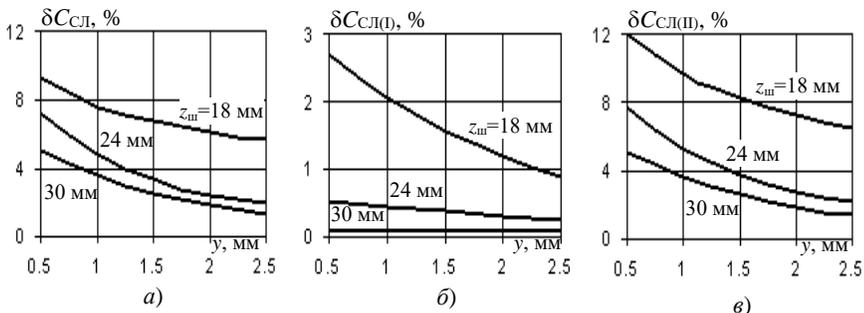


Рис. 4.5. ФВ соседних лопаток при $z_{ш}=18, 24, 30$ мм: $\delta C_{сл}(y)$ – суммарное влияние в положениях РК I и II (а), $\delta C_{сл(I)}(y)$ – в положении РК I (б), $\delta C_{сл(II)}(y)$ – в положении РК II (в)

Показано, что влияние соседних лопаток в положении РК II многократно превышает его влияние в положении РК I, причем перепад усиливается с увеличением $z_{ш}$.

Вместе с тем следует отметить, что ФВ, полученные в ИЦ с идеализированными ФП (выражения (4.4) и (4.6)) отличаются от ФП реальной ИЦ наличием дробных множителей в выражениях разностных напряжений ΔU_I и ΔU_{II} ((4.3) и (4.5) соответственно):

$$D_I^* = \frac{1}{1 - \frac{L_d}{L_0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta L_0}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{сл(I)}}{L_0}},$$

$$D_{II}^* = \frac{1}{1 - \frac{L_d}{L_0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta L_0}{L_0} - \frac{\Delta L_{сл(II)}}{L_0}},$$

где оба первых сомножителя, величина каждого из которых определяется $L_d = \Delta L_{y,max}$, будут равны постоянному числу 1,019. Что же касается вторых сомножителей, то наличие в их знаменателях слагаемого $\frac{\Delta L_0}{L_0}$ означает недокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД, которая

устраняется способом, предложенным в разделе 5, а потому влияние $\frac{\Delta L_0}{L_0}$ можно не учитывать. Тогда выражения для дробных множителей примут вид:

$$D_I^* = 1,019 \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ(I)}}}{L_0} \right)},$$

$$D_{II}^* = 1,019 \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Delta L_{\text{СЛ(II)}}}{L_0}}.$$

Поскольку слагаемые в знаменателях дробных множителей $\left(\frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{СЛ(I)}}}{L_0} \right) \ll 1$ и $\frac{\Delta L_{\text{СЛ(II)}}}{L_0} \ll 1$, то, воспользовавшись разложением в степенные ряды, ограниченные двумя слагаемыми, выражения для дробных множителей можно записать в виде:

$$D_I^* = 1,019 \cdot (1 + \Delta L_y + \Delta L_{\text{СЛ(I)}}),$$

$$D_{II}^* = 1,019 \cdot (1 + \Delta L_{\text{СЛ(II)}}).$$

Представляется очевидным, что дробные множители D_I^* и D_{II}^* оказывают влияние не только на экстремальные значения кодов C_{II}^* и C_I^* , но и на их разность:

$$\Delta C^* = C_{II}^* - C_I^* = \Delta C_0 (D_{II}^* - D_I^*) + C_{II} (D_{II}^* - D_I^*) + \Delta C_y D_I^* + \Delta C_{\text{СЛ(I)}} D_I^* - \Delta C_{\text{СЛ(II)}} D_{II}^*.$$

Подстановка D_I^* и D_{II}^* в выражение разности кодов ΔC^* приводит к появлению слагаемых второго порядка малости, которые, как показали числовые оценки, почти на два порядка меньше двух последних слагаемых в выражении определения ΔC^* .

Поэтому для получения ФВ соседних лопаток в реальной ИЦ можно использовать выражение

$$\delta C_{\text{сл}}^* = \frac{\Delta C_{\text{сл}} D_1^* - \Delta C_{\text{сл}} D_{\text{II}}^*}{\Delta C_{y, \text{max}}} \cdot 100\% .$$

Расчеты показали, что характер зависимости $\delta C_{\text{сл}}^*(y)$ и $\delta C_{\text{сл}}(y)$ (рис. 4.5, а) одинаков, но при $z_{\text{ш}} = 18$ мм максимальное отклонение от функции в сторону уменьшения составляет 0,3% при $y = 0,5$ мм (для $z_{\text{ш}} = 24$ и 30 мм они составляют 0,18% и 0,12% соответственно).

4.2. Влияние температуры контролируемой и соседних лопаток

Результаты исследований температурных воздействий на лопатки, применяемые в турбинах ГТД, показали увеличение эквивалентной индуктивности ЧЭ ОВТД (а, следовательно, и первичной обмотки СТ) с увеличением температуры, что связано с увеличением удельного сопротивления материала лопатки, преобладающим над соответствующими изменениями геометрических параметров [3]. Так как в компрессорных лопатках используются те же материалы, то аналогичные результаты можно ожидать и в отношении лопаток, применяемых в компрессорах.

С учетом этого выражения (4.1) и (4.2) примут вид:

$$L_{\text{СТ(I)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_0 - \Delta L_y - \Delta L_{\text{сл(I)}} + \Delta L_{\text{кл}\theta} + \Delta L_{\text{сл}\theta(\text{I})} , \quad (4.14)$$

$$L_{\text{СТ(II)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_0 - \Delta L_{\text{сл(II)}} + \Delta L_{\text{сл}\theta(\text{II})} , \quad (4.15)$$

где $\Delta L_{\text{кл}\theta}$, $\Delta L_{\text{сл}\theta(\text{I})}$ и $\Delta L_{\text{сл}\theta(\text{II})}$ - изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ, связанные с температурными воздействиями на контролируемую лопатку (КЛ) (положение РК I), а также на соседние лопатки (в положениях РК I и II соответственно).

Выражения (4.14) и (4.15) дают наглядное представление о влиянии температурных воздействий как на соседние, так и на контролируемую лопатку, и, как следствие, на эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ ($L_{\text{СТ}}^{\text{ext}}$) при фиксированном значении РЗ (y) и на качественном уровне. Однако $L_{\text{СТ(I)}}^{\text{ext}}$ и $L_{\text{СТ(II)}}^{\text{ext}}$ являются функциями РЗ (y) и температуры (θ), представленными в разделе 2.1 (рис. 2.4) как семейство ФП.

Количественные оценки влияния указанных температурных воздействий рассматриваются далее поэтапно в соответствии с принятой методикой.

Определение функций $\Delta L_{\text{кл}\theta}(y)$, $\Delta L_{\text{сл}\theta(\text{I})}(y)$ и $\Delta L_{\text{сл}\theta(\text{II})}(y)$. Для получения перечисленных функциональных зависимостей применяется та же модель ЭМВ ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками, которая использовалась в разделе 4.1, но с учетом температурных воздействий на лопатки. При этом предполагается, что температурные воздействия вызывают изменения удельного сопротивления материала лопаток и их геометрических параметров. Однако результаты исследований показали доминирующее влияние температуры на удельное сопротивление, а потому изменения, связанные с геометрическими параметрами лопаток можно не учитывать.

Методика проведения вычислительных экспериментов аналогична той, что использовалась ранее – моделируются ФП ОВТД с учетом влияния соседних лопаток, а затем ФП с учетом температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки, как в положении РК I, так и в положении РК II.

На рис. 4.6 сплошными линиями представлены семейства ФП ОВТД, полученные с учетом влияния соседних лопаток, но без учета температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки (раздел 4.1, рис. 4.1). Пунктирными линиями обозначены те же семейства ФП, но полученные с учетом температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки.

Как и ожидалось, температурные воздействия на лопатки вызывают увеличение как индуктивности $L_{\text{СТ(I)}}^{\text{ext}}$, так и индуктивности $L_{\text{СТ(II)}}^{\text{ext}}$, а их изменения ($\Delta L_{\text{кл}\theta}(y)$, $\Delta L_{\text{сл}\theta(\text{I})}(y)$ и $\Delta L_{\text{сл}\theta(\text{II})}(y)$) – величины положительные, которые определяются как разности ФП с учетом и без учета температурных воздействий. Причем в положении РК I – это суммарные изменения эквивалентной индуктивности, связанные с температурными воздействиями как на контролируемую, так и на соседние лопатки $\Delta L_{\text{ксл}\theta(\text{I})}(y) = \Delta L_{\text{к}\theta}(y) + \Delta L_{\text{сл}\theta(\text{I})}(y)$. Функции $\Delta L_{\text{ксл}\theta(\text{I})}(y)$ и $\Delta L_{\text{сл}\theta(\text{II})}(y)$ изображены на рис. 4.7. Их величины монотонно возрастают с уменьшением y . Как следует из графиков изменение

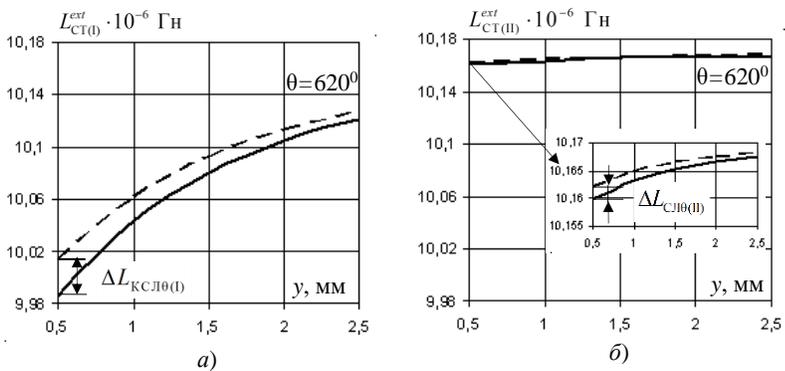


Рис. 4.6. Семейство ФП $L_{CT(\theta)}^{ext}(y, \theta)$ (а) и $L_{CT(\theta)}^{ext}(y, \theta)$ (б) без учета температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки (сплошные линии) и с их учетом (пунктир)

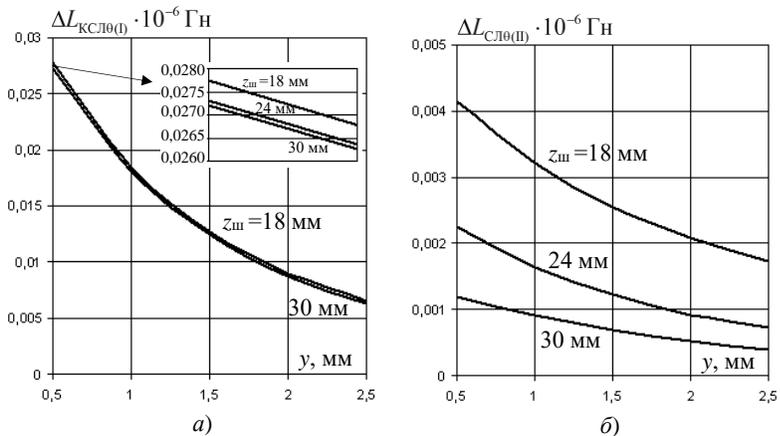


Рис. 4.7. Функции $\Delta L_{КСЛ\theta(\theta)}(y)$ (а) и $\Delta L_{СЛ\theta(\theta)}(y)$ (б) при различных значениях шага установки лопаток $z_{ш}$

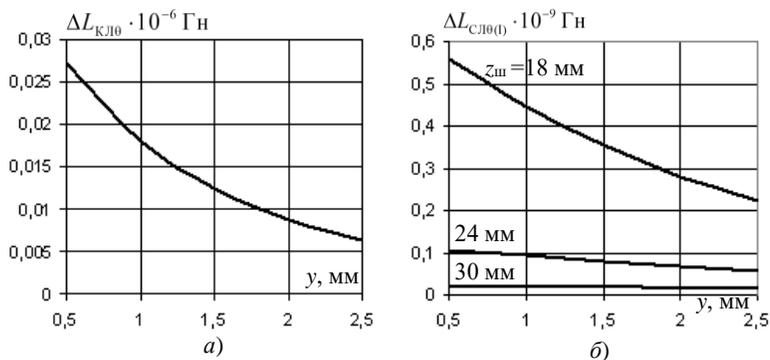


Рис. 4.8. Изменения индуктивности первичной обмотки СТ в положении РК I, связанные с температурными воздействиями на контролируемую ($\Delta L_{\text{кл}0}(y)$) (а) и соседние ($\Delta L_{\text{сл}0(i)}(y)$) (б) лопатки

шага $z_{\text{ш}}$ оказывает незначительное влияние на $\Delta L_{\text{ксл}0(i)}(y)$ – отклонения не превышают единиц процентов. Можно предположить, что причина тому – доминирующее влияние температурных воздействий на контролируемую лопатку по сравнению с соседними.

Для подтверждения этого предположения были проведены вычислительные эксперименты с целью получения зависимости $\Delta L_{\text{ксл}0(i)}(y)$. В таких экспериментах использовалась модель ЭМВ ЧЭ с контролируемой лопаткой (без учета соседних лопаток (раздел 2.1)) при наличии и отсутствии температурных воздействий на контролируемую лопатку.

График функции $\Delta L_{\text{ксл}0(i)}(y)$ изображен на рис. 4.8, а. Зависимость $\Delta L_{\text{сл}0(i)}(y)$ определяется как разность между $\Delta L_{\text{ксл}0(i)}(y)$ и $\Delta L_{\text{кл}0}(y)$, она изображена на рис. 4.8, б.

Действительно, графики на рис. 4.8 подтверждают доминирующее влияние температурных воздействий на контролируемую лопатку по сравнению с теми же воздействиями на соседние лопатки.

Влияние температурных воздействий на лопатки и выходные коды ИЦ. Для проведения исследований аналогично предыдущему разделу,

выполняется анализ ИЦ с использованием результатов, полученных на первом этапе (функции $\Delta L_{\text{кЛ}\theta}(y)$, $\Delta L_{\text{сЛ}\theta(\text{I})}(y)$ и $\Delta L_{\text{сЛ}\theta(\text{II})}(y)$).

Полагая, что в соответствии с разделом 2.2 $L_1 = L_{\text{И}} = L_0 - L_{\text{д}}$, а $L_2 = L_{\text{СТ(I)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_{\theta} - \Delta L_y - \Delta L_{\text{сЛ(I)}} + \Delta L_{\text{кЛ}\theta} + \Delta L_{\text{сЛ}\theta(\text{I})}$ в положении РК I, после ряда преобразований, напряжение на выходах ПТН₁ и ПТН₂ примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{I}} &= ER\Delta t \left(\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} \right) = \\ &= E \left(\frac{\Delta L_{\theta}}{L_0} + \frac{L_{\text{д}}}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{сЛ(I)}}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{кЛ}\theta}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{сЛ}\theta(\text{I})}}{L_0} \right) \times \\ &\times \frac{1}{\left(1 - \frac{L_{\text{д}}}{L_0} \right)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta L_{\theta}}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{сЛ(I)}}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{кЛ}\theta}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{сЛ}\theta(\text{I})}}{L_0} \right)} \end{aligned} \quad (4.16)$$

(предполагается, что $R \frac{\Delta t}{L_0} = 1$).

Если в знаменателях дробных множителей в выражении (4.16) пренебречь слагаемыми $\frac{\Delta L_{\theta}}{L_0}$, $\frac{L_{\text{д}}}{L_0}$, $\frac{\Delta L_y}{L_0}$, $\frac{\Delta L_{\text{сЛ(I)}}}{L_0}$, $\frac{\Delta L_{\text{кЛ}\theta}}{L_0}$ и $\frac{\Delta L_{\text{сЛ}\theta(\text{I})}}{L_0}$, то код на выходе ИЦ (АЦП) в положении РК I примет вид:

$$C_{\text{I}}^{\text{v}} \approx K_{\text{М}} K_{\text{С}} E \left(\frac{\Delta L_{\theta}}{L_0} + \frac{L_{\text{д}}}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{сЛ(I)}}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{кЛ}\theta}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{сЛ}\theta(\text{I})}}{L_0} \right). \quad (4.17)$$

В положении РК II $L_1 = L_{\text{И}} = L_0 - L_{\text{д}}$, а $L_2 = L_{\text{СТ(II)}}^{\text{ext}} = L_0 + \Delta L_{\theta} - \Delta L_{\text{сЛ(II)}} + \Delta L_{\text{сЛ}\theta(\text{II})}$ и разностное напряжение

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{II}} &= E \left(\frac{\Delta L_{\theta}}{L_0} + \frac{L_{\text{д}}}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{сЛ(II)}}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{сЛ}\theta(\text{II})}}{L_0} \right) \times \\ &\times \frac{1}{1 - \frac{L_{\text{д}}}{L_0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta L_{\theta}}{L_0} - \frac{\Delta L_{\text{сЛ(II)}}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{сЛ}\theta(\text{II})}}{L_0}} \end{aligned} \quad (4.18)$$

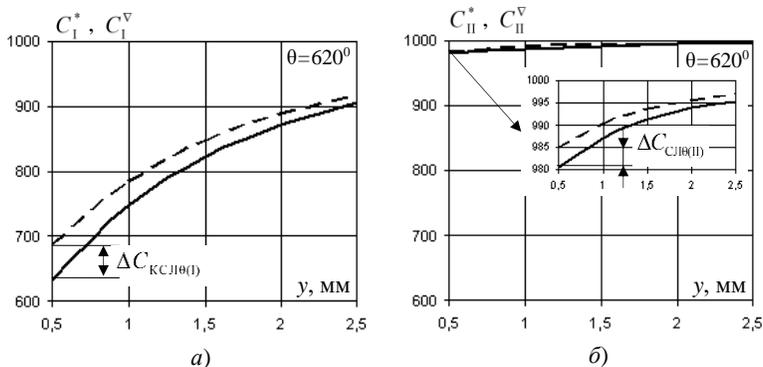


Рис. 4.9. Семейства ФП ИЦ: $C_1^*(y, \theta)$ (а), $C_{II}^*(\theta)$ (б) без учета температурных воздействий на лопатки (сплошные линии), $C_1^v(y, \theta)$ (а), $C_{II}^v(\theta, y)$ (б) – с их учетом (пунктир)

Тогда, пренебрегая в знаменателе дробных множителей выражения (4.18) слагаемыми $\frac{\Delta L_\theta}{L_0}$, $\frac{L_d}{L_0}$, $\frac{\Delta L_{CII(\theta)}}{L_0}$ и $\frac{\Delta L_{CII\theta(\theta)}}{L_0}$, код на выходе ИЦ (АЦП) в положении РК II можно записать в виде:

$$C_{II}^v \approx K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_\theta}{L_0} + \frac{L_d}{L_0} - \frac{\Delta L_{CII(\theta)}}{L_0} + \frac{\Delta L_{CII\theta(\theta)}}{L_0} \right). \quad (4.19)$$

На рис. 4.9 (по аналогии с рис. 4.6) сплошными линиями представлено семейство ФП ИЦ в виде зависимостей $C_1^*(y, \theta)$ и $C_{II}^*(\theta)$, полученное с учетом влияния соседних лопаток при отсутствии температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки (раздел 4.1, рис. 4.3). Зависимости $C_1^v(y, \theta)$ и $C_{II}^v(\theta, y)$, вычисленные по формулам (4.17) и (4.19) с учетом температурных воздействий на лопатки, представлены на рис. 4.9 пунктирными линиями. Там же показаны разности кодов $\Delta C_{KCII\theta(\theta)} = C_1^v - C_1^*$ и $\Delta C_{CII\theta(\theta)} = C_{II}^v - C_{II}^*$, характеризующие температурные воздействия на контролируемую и соседние лопатки в положении РК I и на соседние лопатки в положении РК II.

Как и ожидалось, характер зависимостей ФП ОВТД и ИЦ, представленных на рис. 4.6 и 4.9 аналогичен. Аналогичны и соотношения разностных значений индуктивностей и кодов в положениях РК I и РК II, равно как и характер их изменений от y (рис. 4.7 и 4.10).

Если в выражении (4.17) предположить равным нулю $\frac{\Delta L_{\text{кЛ}\theta}}{L_0}$ (или $\frac{\Delta L_{\text{сЛ}\theta(\text{I})}}{L_0}$), то можно получить изменения кода на выходе ИЦ в положении РК I, связанные с температурным воздействием только на соседние (или только на контролируемую) лопатки. Они изображены на рис. 4.11 и аналогичны соответствующим графикам на рис. 4.8.

Функции влияния температурных воздействий на лопатки и разность кодов. Разность экстремальных значений кодов в ИЦ (АЦП):

$$\Delta C^{\nabla} = C_{\text{II}}^{\nabla} - C_{\text{I}}^{\nabla}, \quad (4.20)$$

где C_{II}^{∇} и C_{I}^{∇} определяются выражениями (4.19) и (4.17) соответственно, а с учетом выражений (4.8) и (4.9) могут быть представлены в виде

$$C_{\text{I}}^{\nabla} = \Delta C_{\theta} + C_{\text{д}} - \Delta C_{\text{y}} - \Delta C_{\text{сЛ(I)}} + \Delta C_{\text{кЛ}\theta} + \Delta C_{\text{сЛ}\theta(\text{I})}, \quad (4.21)$$

$$C_{\text{II}}^{\nabla} = \Delta C_{\theta} + C_{\text{д}} - \Delta C_{\text{сЛ(II)}} + \Delta C_{\text{сЛ}\theta(\text{II})}. \quad (4.22)$$

Тогда после подстановки (4.21) и (4.22) в выражение (4.20) разность кодов ΔC^{∇} примет вид

$$\Delta C^{\nabla} = \Delta C_{\text{y}} + \Delta C_{\text{сЛ(I)}} - \Delta C_{\text{сЛ(II)}} - \Delta C_{\text{кЛ}\theta} - \Delta C_{\text{сЛ}\theta(\text{I})} + \Delta C_{\text{сЛ}\theta(\text{II})}. \quad (4.23)$$

Представляется очевидным, что ФВ температурных воздействий на лопатки, которая характеризует возможные погрешности, можно представить выражением

$$\delta C_{\text{кСЛ}\theta} = \frac{\Delta C_{\text{сЛ}\theta(\text{II})} - \Delta C_{\text{кЛ}\theta} - \Delta C_{\text{сЛ}\theta(\text{I})}}{\Delta C_{\text{y,max}}} \cdot 100\%, \quad (4.24)$$

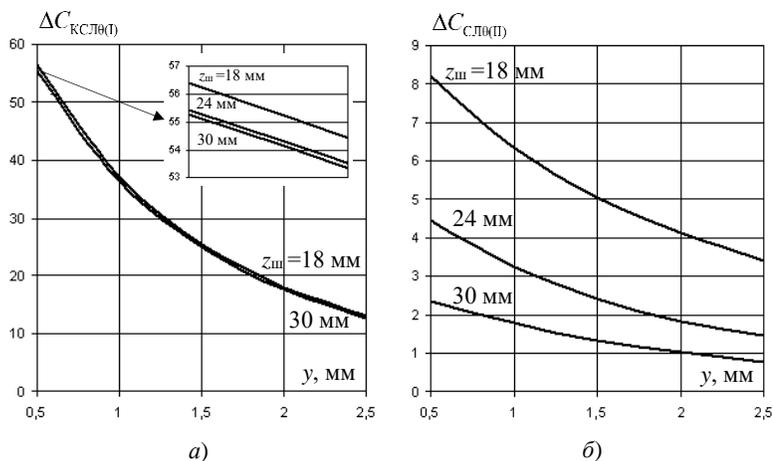


Рис. 4.10. Изменения кодов на выходе ИЦ, связанные температурными воздействиями на лопатки ($\Delta C_{KCЛ0(\Pi)}$ и $\Delta C_{СЛ0(\Pi)}$)

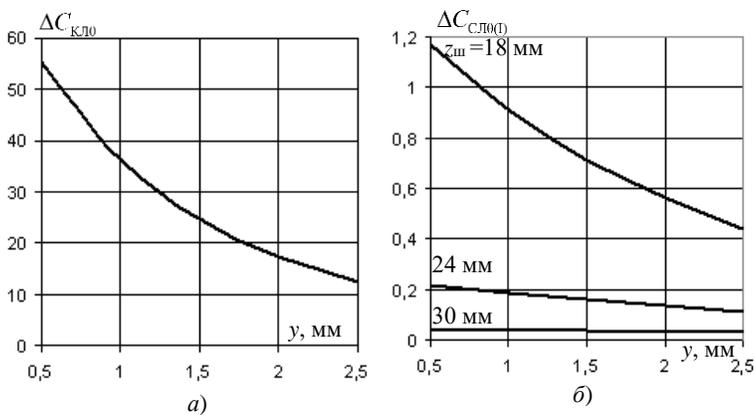


Рис. 4.11. Изменения кодов в положении РК I, связанные с температурными воздействиями на контролируемую (а) и соседние лопатки (б)

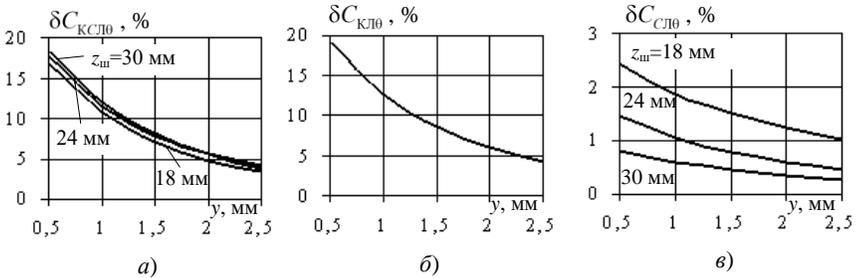


Рис. 4.12. ФВ температуры на контролируемую и соседние лопатки при $z_{ш}=18, 24, 30$ мм: $\delta C_{KCЛЮ}(y)$ (а), $\delta C_{КЛЮ}(y)$ (б), $\delta C_{СЛЮ}(y)$ (в)

где $\Delta C_{y,max}$ - максимально возможное изменение кода в заданном диапазоне изменений РЗ (y -координаты).

Из выражения (4.24) можно получить как ФВ температурных воздействий на контролируемую ($\delta C_{КЛЮ}$), так и на соседние лопатки ($\delta C_{СЛЮ}$) (без учета знака):

$$\delta C_{КЛЮ} = \frac{\Delta C_{КЛЮ}}{\Delta C_{y,max}} \cdot 100\% , \quad (4.25)$$

$$\delta C_{СЛЮ} = \frac{\Delta C_{СЛЮ(II)} - \Delta C_{СЛЮ(I)}}{\Delta C_{y,max}} \cdot 100\% . \quad (4.26)$$

На рис. 4.12, а представлены ФВ температурных воздействий на контролируемую и соседние лопатки в виде $\delta C_{KCЛЮ}(y)$ (4.24) в предположении, что шаг установки лопаток на РК составляет 18, 24 и 30 мм. На рис. 4.12, б представлены ФВ температурных воздействий на контролируемую лопатку в виде $\delta C_{КЛЮ}(y)$ (4.25). Результаты расчетов, представленные на рис. 4.12, а, б позволяют определить ФВ, связанные с суммарным действием температуры на соседние лопатки в положениях РК I и РК II. В виде функции $\delta C_{СЛЮ}(y)$ они представлены на рис. 4.12, в (при шаге равном 18, 24 и 30 мм). Даже при минимальном значении $z_{ш}$ (18 мм) $\delta C_{СЛЮ}$ не превышает 3%. При этом необходимо особо отметить, что данные на рис. 4.12, в в основном определяются влиянием соседних лопаток в положении РК II, а влияние

соседних лопаток в положении РК I пренебрежимо мало [24, 25] (дополнительные исследования, проведенные для $z_{ш} = 24$ мм (такой шаг используется в реально существующих РК компрессора), показали, что в положении РК I максимальные значения $\delta L_{Сл\theta}$ составляет менее 0,1% и это более, чем на порядок меньше, чем в положении РК II).

С учетом анализа, проведенного в разделе 4.1, дробные множители в выражениях (4.16) и (4.18) для реальной ИЦ можно записать в виде¹³

$$D_1^{\nabla} = 1,019 \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_{Сл(I)}}{L_0} - \frac{\Delta L_{Кл\theta}}{L_0} - \frac{\Delta L_{Сл\theta(I)}}{L_0} \right)},$$

$$D_{II}^{\nabla} = 1,019 \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta L_{Сл(II)}}{L_0} - \frac{\Delta L_{Сл\theta(II)}}{L_0} \right)}.$$

Выражения для дробных множителей D_1^{∇} и D_{II}^{∇} по аналогии с D_1^* и D_{II}^* также представляются степенным рядом, ограниченным двумя слагаемыми:

$$D_1^{\nabla} = 1,019 \cdot \left(1 + \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_{Сл(I)}}{L_0} - \frac{\Delta L_{Кл\theta}}{L_0} - \frac{\Delta L_{Сл\theta(I)}}{L_0} \right),$$

$$D_{II}^{\nabla} = 1,019 \cdot \left(1 + \frac{\Delta L_{Сл(II)}}{L_0} - \Delta L_{Сл\theta(II)} \right).$$

С учетом дробных множителей D_1^{∇} и D_{II}^{∇} разность экстремальных значений кодов (выражение (4.23)) примет вид

$$\Delta C^{\nabla} = \Delta C_{\theta} (D_{II}^{\nabla} - D_1^{\nabla}) + C_d^* (D_{II}^{\nabla} - D_1^{\nabla}) + \Delta C_y D_1^{\nabla} + \Delta C_{Сл(I)} D_1^{\nabla} -$$

$$- \Delta C_{Сл(II)} D_{II}^{\nabla} + \Delta C_{Сл\theta(II)} D_{II}^{\nabla} - \Delta C_{Кл\theta(I)} D_1^{\nabla} - \Delta C_{Сл\theta(I)} D_1^{\nabla}$$

¹³ В разделе 4.1 было определено численное значение первого сомножителя (1,019), а также отмечалась возможность устранения слагаемого $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ в знаменателях второго сомножителя.

Подстановка D_1^∇ и D_{II}^∇ , представленного двумя слагаемыми, в выражение разности кодов ΔC^∇ также приводит к появлению слагаемых второго порядка малости, которыми можно пренебречь. Поэтому для получения ФВ температуры контролируемой и соседних лопаток в реальной ИЦ можно использовать формулу

$$\delta C_{КСЛ0}^\nabla = \frac{\Delta C_{СЛ0(II)} D_1^\nabla - \Delta C_{КСЛ0(I)} D_1^\nabla - \Delta C_{СЛ0(I)} D_1^\nabla}{\Delta C_{y,max}} \cdot 100\%,$$

с помощью которой были определены ФВ температуры контролируемой и соседних лопаток ($\delta C_{КСЛ0}^\nabla(y)$ для $z_{ш} = 30$ мм, только контролируемой лопатки $\delta C_{КСЛ0}^\nabla(y)$ и только соседних лопаток $\delta C_{СЛ0}^\nabla(y)$ для $z_{ш} = 18$ мм). Отличия между перечисленными ФВ идеализированной и реальной ИЦ возрастают с уменьшением РЗ (y), но не превышают 0,24%, 0,22%, 0,08% соответственно¹⁴ при $y = 0,5$ мм.

4.3. Влияние осевых смещений

Осевые смещения РК наблюдаются на всех ступенях компрессора (кроме одной – высокого давления).

С учетом влияния ОС (x) выражения (1.1) и (1.2) примут вид:

$$L_{СТ(I)}^{ext} = L_0 + \Delta L_0 - \Delta L_y + \Delta L_x, \quad (4.27)$$

$$L_{СТ(II)}^{ext} = L_0 + \Delta L_0, \quad (4.28)$$

где ΔL_x - изменение эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ, связанное с ОС (x). При этом $L_{СТ(I)}^{ext}$ и $L_{СТ(II)}^{ext}$ являются функциями РЗ (y), ОС (x) и температуры (θ).

Решение задачи о количественной оценке влияния ОС (x) на выходные значения кодов системы состоит из тех же этапов, что и решение задач об оценке МФ, рассмотренных в разделах 4.1, 4.2.

¹⁴ Краткое описание способа уменьшения влияния соседних лопаток и температурных воздействий как на соседние, так и на контролируемую лопатки приведено в заключительной части раздела 3.2.

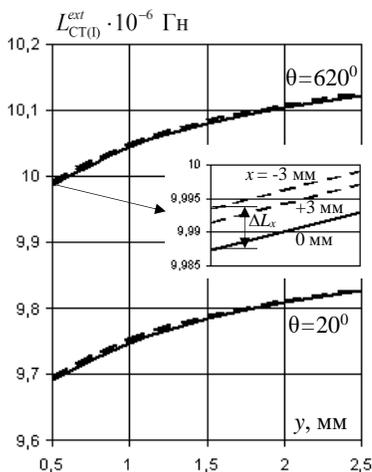


Рис. 4.13. Семейство ФП $L_{CT(0)}^{ext}(y, \theta)$ без учета ОС (x) – сплошные линии и с их учетом – пунктир

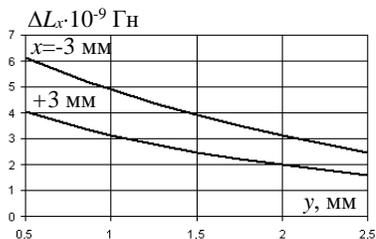


Рис. 4.14. Изменения индуктивности первичной обмотки СТ, связанные с влиянием ОС ($\Delta L_x(y)$)

Определение функций $\Delta L_x(y)$. Для количественной оценки влияния ОС (x) использовалась модель ЭМВ ЧЭ с торцевой частью компрессорной лопатки (раздел 2.1). Результаты моделирования получены в предположении размещения центра ЧЭ ОБТД и начала системы отсчета $OXYZ$ в г.ц.л. (рис. 1.1) и представляют собой зависимости $L_{ЧЭ}^{ext}(y)$ при нормальной температуре, которые пересчитаны в первичную обмотку СТ с учетом номинальной температуры. Окончательные результаты представлены на рис. 4.13 в виде зависимостей эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ от координаты y в положении РК I при отсутствии ОС (сплошная линия) и их наличии (значения $x = \pm 3$ мм, пунктирные линии). В положении РК II влияние ОС отсутствует (а влияние соседних лопаток в обоих положениях РК не учитывается). Как следует из рис. 4.13, ОС (x) вызывают увеличение индуктивности $L_{CT(0)}^{ext}$ (ΔL_x – величина положительная). Функция $\Delta L_x(y)$ изображена на рис. 4.14. Величина ΔL_x монотонно возрастает с уменьшением y .

Влияние осевых смещений на выходные коды ИЦ. Для проведения исследований предусмотрен упрощенный анализ ИЦ с использованием функции $\Delta L_x(y)$.

Полагая, что в соответствии с разделом 2.1 $L_1 = L_{II} = L_0 - L_d$, а $L_2 = L_{CT(1)}^{ext} = L_0 + \Delta L_0 - \Delta L_y + \Delta L_x$ в положении РК I, после ряда преобразований, аналогичных приведенным в указанном разделе, напряжение на выходах ПТН₁ и ПТН₂ примет вид:

$$\Delta U_1 = ER \Delta t \left(\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} \right) = E \left(\frac{\Delta L_0}{L_0} + \frac{L_d}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_x}{L_0} \right) \times$$

$$\times \frac{1}{1 - \frac{L_d}{L_0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta L_0}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_x}{L_0}} \quad (4.29)$$

(предполагается, что $R \frac{\Delta t}{L_0} = 1$).

Если в знаменателях дробных множителей в выражении (4.29) пренебречь слагаемыми $\frac{\Delta L_0}{L_0}$, $\frac{L_d}{L_0}$, $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ и $\frac{\Delta L_x}{L_0}$, то код на выходе ИЦ (АЦП) в положении РК I можно записать в виде

$$C_1^\circ \approx K_M K_C E \left(\frac{\Delta L_0}{L_0} + \frac{L_d}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_x}{L_0} \right). \quad (4.30)$$

На рис. 4.15 сплошными линиями представлено семейство ФП ИЦ в виде зависимостей $C_1(y, \theta)$, полученное без учета влияния ОС (раздел 2.2, рис. 2.10). Зависимости $C_1^\circ(y, \theta)$, вычисленные по формуле (4.30) с учетом влияния ОС (x), представлены на рис. 4.15 пунктирными линиями. Там же показаны разности кодов $\Delta C_{x(1)} = C_1 - C_1^\circ$, характеризующие влияние ОС (x) в положении РК I. Очевидно, что характер зависимостей ФП ОБТД и ИЦ, представленных на рис. 4.13 и 4.15 аналогичен. Аналогичны и соотношения разностных значений индуктивностей и кодов, равно как и характер их изменений от y (рис. 4.14 и 4.16).

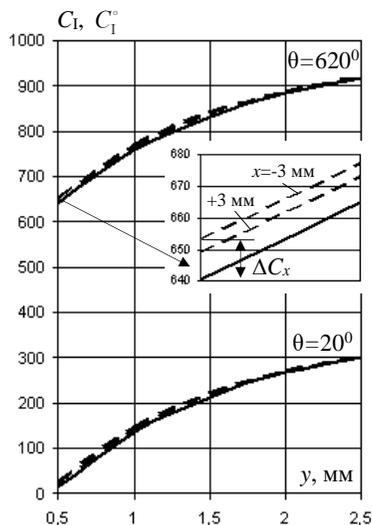


Рис. 4.15. Семейства ФП ИЦ: без учета ОС ($C_I(y, \theta)$) – сплошные линии, а с их учетом ($C_I^o(y, \theta)$) – пунктир

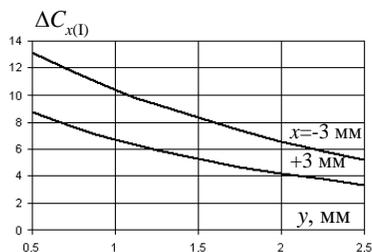


Рис. 4.16. Изменения кодов на выходе ИЦ, связанные с влиянием ОС ($\Delta C_{x(l)}(y)$)

Функции влияния осевых смещений на разность кодов. Разность экстремальных значений кодов на выходе ИЦ (АЦП)

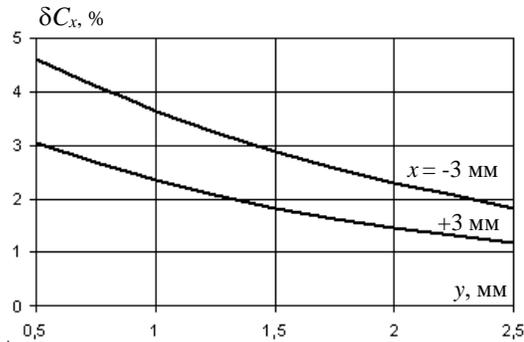
$$\Delta C^o = C_{II} - C_I^o, \quad (4.31)$$

где C_{II} и C_I^o определяются выражениями (2.11) и (4.30) соответственно (предполагается, что влияние ОС и соседних лопаток на код C_{II} отсутствует). С учетом введенных в разделе 2.2 составляющих кода C_I (рис. 2.8, а) код C_I^o может быть представлен в виде

$$C_I^o = \Delta C_\theta + C_d - \Delta C_y + \Delta C_{x(l)}. \quad (4.32)$$

Код C_{II} определяется выражением (2.11). Тогда после подстановки (4.32) и (2.11) в выражение (4.31) разность кодов

$$\Delta C^o = \Delta C_y - \Delta C_{x(l)}. \quad (4.33)$$

Рис. 4.17. ФВ ОС $\delta C_x(y)$

Представляется очевидным, что ФВ ОС (x) можно представить выражением

$$\delta C_x = \frac{\Delta C_{x(0)}}{\Delta C_{y,max}} \cdot 100\% . \quad (4.34)$$

На рис. 4.17 представлено семейство ФВ $\delta C_x(y)$ (без учета знака). В диапазоне изменений ОС (x) от -3 до +3 мм ФВ не превышают 5% при $y = 0,5$ мм и 2% при $y = 2,5$ мм.

С учетом анализа в разделах 4.1 и 4.2 дробные множители ФП в выражениях (4.29) и (2.10)

$$D_I^\circ = 1,019 \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_x}{L_0}}, \quad D_{II}^\circ = 1,019 .$$

После разложения D_I° в степенной ряд и ограничения ряда двумя слагаемыми $D_I^\circ = 1,019 \cdot \left(1 + \frac{\Delta L_y}{L_0} - \frac{\Delta L_x}{L_0} \right)$. Полученные таким образом выражение D_I° , как и $D_{II}^\circ = 1,019$, используются в выражениях C_I° и $C_{II}^\circ = \Delta C_0 + C_d$, а с их учетом разность кодов примет вид

$$\Delta C^{\circ} = \Delta C_0^{\circ} (D_{II}^{\circ} - D_I^{\circ}) + C_d (D_{II}^{\circ} - D_I^{\circ}) + \Delta C_y D_I^{\circ} - \Delta C_x D_I^{\circ}.$$

Подстановка D_I° и D_{II}° в выражение ΔC° приводит к появлению слагаемых второго порядка малости, которыми по сравнению с последним слагаемым можно пренебречь, что позволяет получить ФВ ОС (x) реальной ИЦ:

$$\delta C_x^{\circ} = \frac{\Delta C_x D_I^{\circ}}{\Delta C_{y, \max}} \cdot 100\%.$$

Расчеты $\delta C_x^{\circ}(y)$ показали, что отличия ФВ идеализированной и реальной ИЦ (при $x = -3\text{мм}$) составляет около 0,06%. С увеличением ОС (x) $\delta C_x^{\circ}(y)$ возрастает и, когда связанные с ростом ОС (x) погрешности становятся недопустимого уровня, приходится использовать кластерные методы, обеспечивающие измерение не только РЗ (y), но и ОС (x). Но при этом необходим дополнительный ОВТД и дополнительное установочное отверстие в статорной оболочке.

Заключение к разделу 4

Для количественной оценки влияния всех рассматриваемых МФ предложена единая методика, предусматривающая три этапа. На первом этапе для исследуемого МФ определяются связанные с ним изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ ОВТД как функции РЗ (y) в положениях РК I и РК II. На втором этапе данные, полученные на первом, используются в упрощенном анализе идеализированной ИЦ для количественной оценки влияния исследуемого МФ на выходные коды ИЦ (АЦП) в зависимости от РЗ (y) (т.е. на ФП ИЦ). И, наконец, на третьем этапе дается количественная оценка влияния исследуемого МФ на разность экстремальных значений кодов на выходе ИЦ (АЦП) в положениях РК II и РК I, которые соответствуют кодам на выходе МК в составе системы, а результаты оценки представляются в виде ФВ исследуемого МФ, характеризующей возможные погрешности.

В соответствии с предложенной методикой получены ФВ соседних лопаток, температурных воздействий на соседние и контролируруемую лопатку, а также ОС РК (x -координаты).

Показано, что ФВ соседних лопаток возрастают с уменьшением РЗ (y) при различных значениях шага установки лопаток (18, 24, 30 мм) и максимального значения (около 10%) достигают при минимальном значении шага (18 мм), причем величина ФВ в основном определяется положением РК II, а в положении РК I максимальное значение ФВ в несколько раз меньше.

ФВ температуры контролируемой и соседних лопаток также возрастают с уменьшением РЗ (y), достигают максимального значения около 17%. При этом величина ФВ в основном определяется влиянием температуры контролируемой лопатки в положении РК I (около 20%), а влияние температуры соседних лопаток больше в положении РК II (около -3%)¹⁵.

Показано также, что ФВ ОС (x) в диапазоне ± 3 мм не превышает 5% (при необходимости для устранения влияния ОС можно использовать кластерный метод, раздел 1.4).

Поскольку ФП реальных ИЦ отличаются от идеализированных наличием дробных множителей, то получены ФВ соседних лопаток, температуры контролируемой и соседних лопаток, а также ОС (x) с учетом дробных множителей. Показано, что максимальное отличие ФВ реальной и идеальной ИЦ не превышает 0,3%.

¹⁵ Краткое описание способа уменьшения влияния температуры на контролируемую и соседние лопатки приведено в заключительной части раздела 3.2.

РАЗДЕЛ 5

ПОГРЕШНОСТИ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Результаты исследований влияния МФ, в том числе количественные оценки влияния температурных воздействий на контролируруемую и соседние лопадки, фактически являются вполне определенным вкладом в изучение возможных погрешностей.

Вместе с тем в настоящей работе остается неизученным принципиально важный эффект «недокомпенсации» температурных воздействий на ОВТД, который проявляется в несовпадении ФП (ГХ) в виде зависимостей разностного кода от РЗ (γ), полученных при нормальной и номинальной температурах. Фактически разность между ними – это ФВ температурных воздействий на ОВТД, и в настоящем разделе рассматривается как наиболее значимая погрешность [27].

Кроме того, исследуются погрешности дискретизации, связанные с изменениями скорости вращения РК и частоты импульсного питания ИЦ. При этом даются количественные оценки как максимально возможной, так и случайной погрешности дискретизации [28].

5.1. Погрешности, связанные с «недокомпенсацией» температурных воздействий на ОВТД

Как и в предыдущем разделе для определения ФП в виде разностного кода ΔC в зависимости от РЗ (γ) при номинальной температуре используются экстремальные значения кодов на выходе ИЦ (АЦП) C_{II} и C_I (в положениях РК II и РК I с учетом тех же допущений, которые упоминаются во вводной части раздела 4). При этом в выражениях C_{II} (2.11) и C_I (2.9) сохраняются дробные множители (см. выражения ΔU_{II} (2.10) и ΔU_I (2.8)), а изменения

эквивалентных индуктивностей первичной обмотки СТ ОВТД от изменений РЗ (y) и температурных воздействий (θ) получены путем моделирования и экспериментально (соответственно):

$$C_{II} = K_M K_C E \left(\frac{L_{II}}{L_0} + \frac{\Delta L_0}{L_0} \right) \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta L_0}{L_0} \right) \left(1 - \frac{L_{II}}{L_0} \right)}, \quad (5.1)$$

$$C_I = K_M K_C E \left(\frac{L_{II}}{L_0} + \frac{\Delta L_0}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} \right) \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_0}{L_0} \right) \left(1 - \frac{L_{II}}{L_0} \right)}. \quad (5.2)$$

Разность кодов C_{II} и C_I , представленных выражениями (5.1) и (5.2), будет соответствовать экстремальному значению разности кодов, определяемому в МК системы, но окажется зависимой от дробных множителей и, как следствие, изменений ΔL_0 , связанных с температурными воздействиями на ОВТД:

$$\Delta C_\theta = C_{II} - C_I = K_M K_C E \frac{\Delta L_y}{L_0} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_0}{L_0} \right) \left(1 + \frac{\Delta L_0}{L_0} \right)}$$

или

$$\Delta C_\theta = K_M K_C E \frac{\Delta L_y}{L_0} \cdot \frac{1}{K_\theta \left(K_\theta - \frac{\Delta L_y}{L_0} \right)},$$

где $K_\theta = 1 + \frac{\Delta L_0}{L_0}$.

Представляется очевидным, что при $\frac{\Delta L_0}{L_0} \ll 1$ и $\frac{\Delta L_y}{L_0} \ll 1$, коэффициент $K_\theta \rightarrow 1$, а разность кодов $C_{II} - C_I$ определяется только изменением РЗ (y) $\left(\Delta C = K_M K_C E \frac{\Delta L_y}{L_0} \right)$ и не зависит от изменений температуры, а это означает,

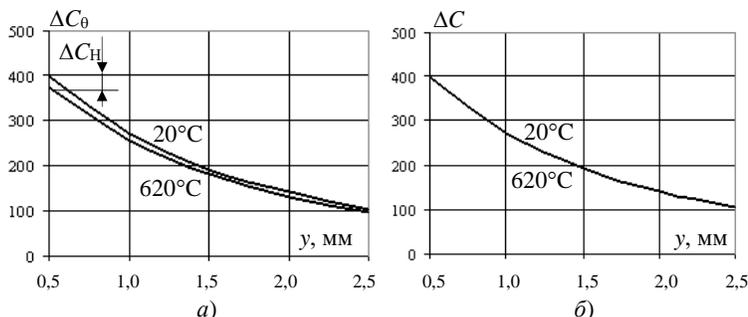


Рис. 5.1. Зависимости $\Delta C_{\theta}(y)$ при нормальной (20°C) и номинальной (620°C) температуре с «недокомпенсацией» (а) и при ее отсутствии (б)

что в системе осуществляется полная самокомпенсация температурных воздействий на ОВТД.

Однако в реальности коэффициент K_{θ} зависит от температуры, а потому в системе наблюдается «недокомпенсация» температурных воздействий. По результатам моделирования ЭМВ ЧЭ и лопатки, применяемой в компрессоре, и по экспериментальным данным были получены количественные

оценки $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ в зависимости от координаты y (РЗ) и $\frac{\Delta L_{\theta}}{L_0}$ для перепада температуры на 600°C (от нормальной до номинальной).

На рис. 5.1 представлены ФП ($\Delta C_{\theta}(y)$) системы, полученные при нормальной температуре (20°C) и номинальной (620°C), которые демонстрируют «недокомпенсацию», составляющую около 20 единиц кода (ΔC_{H} при $y = 0,5$ мм) или более 6% от максимально возможной девиации кода ΔC_{max} в диапазоне от 0,5 до 2,5 мм. Иначе говоря, погрешность, связанная с «недо-

компенсацией» температурных воздействий на ОВТД $\delta C_{\text{H}} = \frac{\Delta C_{\text{H}}}{\Delta C_{\text{max}}} \cdot 100\%$

достаточно велика и составляет более 6%.

Чтобы уменьшить «недокомпенсацию» и связанную с ней погрешность δC_{H} , предлагается способ, предусматривающий умножение вычисленного в

системе значения разностного кода на безразмерное число, определяемое по формуле

$$K_0 \left(K_0 - \frac{\Delta L_y}{L_0} \right) \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Delta L_y}{L_0}} = \left(K_0^2 - K_0 \frac{\Delta L_y}{L_0} \right) \frac{1}{1 - \frac{\Delta L_y}{L_0}},$$

которое в первом приближении равно K_0^2 , если влияние изменений $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ не учитывается. При этом для номинальных температурных условий в проточной части (620 °С) коэффициент $K_0 = 1,03$.

Расчеты показывают, что предлагаемый способ позволяет уменьшить «недокомпенсацию» более чем на два порядка, и на рис. 5.1, б «недокомпенсация» практически неразличима ($\delta C_H \rightarrow 0$). Действительно, при $y = 0,5$ мм «недокомпенсация» составляет лишь 0,2 единицы кода ($\delta C_H < 0,1\%$ и уменьшается с увеличением РЗ (y)). Расчеты показывают также, что с учетом изменений $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ в том же диапазоне РЗ изменения «недокомпенсации» ничтожны и не превышают $5 \cdot 10^{-12}$ единицы кода ($\delta C_H \approx 0$).

5.2. Погрешности дискретизации

Рассматриваются погрешности дискретизации, связанные с изменениями скорости вращения РК и частоты импульсного питания ИЦ, причем (и это отмечалось во вводной части раздела 5) в процессе исследований даются количественные оценки как максимально возможной, так и случайной погрешностей дискретизации.

5.2.1. Максимально возможные погрешности дискретизации

На рис. 1.5 изображена зависимость разности кодов $\Delta C(t)$ ($\bar{C}^{ext} - C(t)$), вычисленная МК в составе системы и представленная как непрерывная функция времени в предположении, что период повторения (T_n) импульсов питания ИЦ (рис. 2.8) и его длительность (Δt) минимальны ($T_n, \Delta t \rightarrow 0$), а

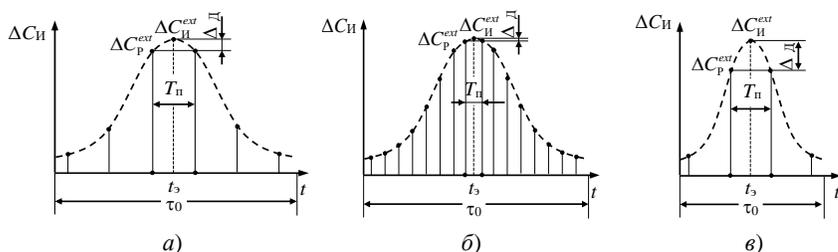


Рис. 5.2. Погрешности, связанные с изменением периода импульсного питания ИЦ при постоянной скорости вращения РК (*а, б*) и с изменением скорости его вращения при постоянном периоде импульсного питания (*а, в*)

потому функции $\Delta C(t)$ можно считать практически непрерывными, но трудно реализуемыми и существующими только в идеале.

Рис. 5.2 иллюстрирует процесс дискретизации с конечным шагом (равным периоду импульсов питания $T_{п}$), но отличающимся по величине в предположении одинаковой скорости вращения РК (рис. 5.2, *а, б*), и, напротив, с постоянным периодом ($T_{п}$), но на другой (более высокой) скорости вращения (рис. 5.2, *а, в*). Идеализированные функции $\Delta C(t)$ на рис. 5.2 показаны пунктиром, а их экстремумы обозначены $\Delta C_{И}^{ext}$. Там же показаны дискретизированные значения функции - ближайšie по значению к $\Delta C_{И}^{ext}$, причём равноудалённые от него по времени (на $T_{п} / 2$), что соответствует наибольшей разности реальных экстремумов $\Delta C_{р}^{ext}$ и идеального $\Delta C_{И}^{ext}$. Эту разность и предлагается далее использовать для оценки погрешности дискретизации, связанной с изменениями периода импульсного питания и скорости вращения РК (аналогичный подход к определению погрешностей дискретизации использовался в работе [3]):

$$\Delta_{д} = \Delta C_{И}^{ext} - \Delta C_{р}^{ext} . \quad (5.3)$$

Очевидно, что при неизменной скорости вращения РК погрешность $\Delta_{д}$ уменьшается с повышением частоты импульсного питания (уменьшения периода $T_{п}$) (рис. 5.2, *а, б*). Однако погрешность возрастает с повышением скорости вращения РК при постоянной частоте (периоде) импульсного питания

(рис. 5.2, а, в). Эти достаточно очевидные соображения должны быть подтверждены количественными оценками погрешностей. Результаты таких исследований приводятся далее.

Для количественной оценки искомых погрешностей та же модель ЭМВ ЧЭ ОВТД с торцами лопаток, которая обеспечивала в разделе 2 определение ФП ЧЭ и ОВТД, используется в расчетах зависимости информативного параметра ОВТД ($L_{СТ}$) от координаты z при заданном значении РЗ (y). При этом моделирование функции $L_{СТ}(z)$ осуществляется с очень малым шагом 0,005 мм, что позволяет считать функцию $L_{СТ}(z)$ практически непрерывной. С помощью известной модели ИЦ [20] функция $L_{СТ}(z)$ (при $y = 0,5$ мм) пересчитывается в изменения кода на выходе ИЦ, т.е. функцию вида $C(z)$ (исходные данные для модели ИЦ: амплитуда импульсного питания $E = 1,25$ В и его длительность $\Delta t = 100 \cdot 10^{-9}$ с, величина сопротивления резисторов в цепях обратной связи ПТН₁, ПТН₂ $R_1 = R_2 = R = 100$ Ом, коэффициент $K_M = 19$, эквивалентное сопротивление ОВТД $R_Э = 17,5$ Ом, $L_d = 0,19 \cdot 10^{-6}$ Гн). Если при отсутствии лопатки полученный в результате моделирования код обозначен как C_∞ и соответствует межлопаточному промежутку, то разность кодов $\Delta C_{И}(z) = C_\infty - C(z)$ можно использовать для определения погрешности дискретизации, полагая функцию $\Delta C_{И}(z)$ также непрерывной (как и ее аналог на рис. 5.2 ($\Delta C_{И}(t)$)).

На рис. 5.3 в безразмерном виде представлена зависимость $\Delta C_{И}(z) / \Delta C_{И}^{ext}$, где $\Delta C_{И}^{ext}$ - экстремальное значение $\Delta C(z)$, полученное на модели ИЦ при заданной координате $y = 0,5$ мм. Предполагается, что РК имеет радиус 0,5 м, число лопаток – 100, скорость вращения изменяется от 3000 до 21000 об/мин, а частота импульсного питания – от $0,5 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^6$ Гц (период (T_n) от $2 \cdot 10^{-6}$ до $0,5 \cdot 10^{-6}$ с).

Если скорость вращения РК 3000 об/мин, то период вращения $T_{РК} = 20 \cdot 10^{-3}$ с, а время пребывания лопатки в зоне чувствительности ОВТД $\tau_0 = 200 \cdot 10^{-6}$ с, причём в линейном выражении τ_0 будет соответствовать шаг установки лопаток $z_d = 31,4$ мм.

Если частота импульсного питания $1 \cdot 10^6$ Гц и период T_n (т.е. шаг дискретизации) составляет $1 \cdot 10^{-6}$ с, то число отсчётов k_t за время τ_0 составит 200,

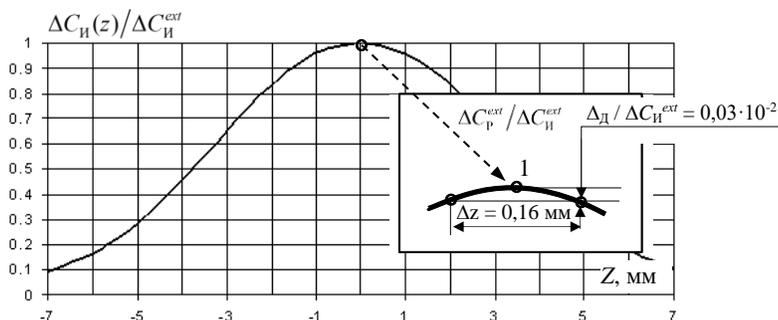


Рис. 5.3. Зависимость $\Delta C_{\text{И}}(z)/\Delta C_{\text{И}}^{\text{ext}}$ и пример количественной оценки погрешности $\Delta_d/\Delta C_{\text{И}}^{\text{ext}}$ «апликация»

а шаг дискретизации в линейном выражении будет равен $\Delta z_{\text{д}} = \frac{z_{\text{д}}}{k_{\tau}}$, т.е.

0,16 мм. Для найденного шага ($\Delta z_{\text{д}} = 0,16$ мм) на функции $\Delta C_{\text{И}}(z)/\Delta C_{\text{И}}^{\text{ext}}$ (рис. 5.3) в соответствии с рис. 5.2 и формулой (5.3) определяется максимальная погрешность дискретизации, выраженная в процентах:

$$\delta_{\text{д}} = \frac{\Delta_{\text{д}}}{\Delta C_{\text{И}}^{\text{ext}}} \cdot 100\% . \quad (5.4)$$

Для указанных выше исходных данных и приведенных результатов моделирования погрешность $\delta_{\text{д}} = 0,03\%$ (на рис. 5.3, «апликация», погрешность представлена в безразмерном виде $-0,03 \cdot 10^{-2}$).

Результаты расчёта погрешности $\delta_{\text{д}}$ для остальных значений частоты импульсного питания ($f_{\text{п}}$) и скорости вращения РК ($N_{\text{РК}}$) в указанных ранее диапазонах изменений, сведены в табл. 5.1, а на рис. 5.4 те же результаты изображены графически.

Из табл. 5.1 и графиков рис. 5.4 следует, что погрешность $\delta_{\text{д}}$ сравнительно невелика и даже при минимальной частоте $f_{\text{п}}$ и наибольшей скорости вращения $N_{\text{РК}}$ не превышает 5,1%. При этом увеличение погрешности связано с увеличением шага дискретизации почти на порядок (в линейном выражении до 2,2 мм).

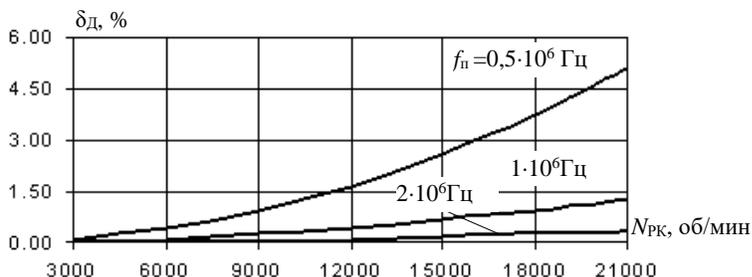


Рис. 5.4. Погрешности δ_d в зависимости от частоты f_n и скорости вращения $N_{РК}$

Таблица 5.1. Погрешности δ_d (в %) в зависимости от частоты f_n и скорости вращения $N_{РК}$

f_n , Гц \ $N_{РК}$, об/мин	$0,5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
3000	0,10	0,03	0,007
6000	0,4	0,10	0,03
9000	0,9	0,23	0,06
12000	1,7	0,4	0,10
15000	2,6	0,7	0,16
18000	3,7	0,9	0,23
21000	5,1	1,3	0,3

Необходимо еще раз отметить, что результаты исследований погрешности дискретизации δ_d , представленные в табл. 5.1 и на рис. 5.4, были получены только для одного, хотя и наименьшего, значения РЗ (γ) 0,5 мм. При этом остались неизученными максимально возможные погрешности дискретизации для других значений РЗ (γ) (до 2,5 мм). Серия вычислительных экспериментов, аналогичных проведенному, но отличающихся выбранными значениями РЗ (γ), обеспечила бы решение задачи в полном объеме, причем каждый эксперимент серии завершался бы определением искомой погрешности по формуле

$$\delta_d = 1 - \Phi\left(\frac{\Delta z}{2}\right), \quad (5.5)$$

где $\Phi(z) = \frac{\Delta C_{и}(z)}{\Delta C_{и}^{ext}}$ - безразмерная функция, равная $\Delta C_{р}(z)/\Delta C_{и}^{ext}$ при $z = z_d / 2$.

Вместе с тем представляется очевидным, что полученные в настоящем разделе количественные оценки погрешности дискретизации могут оказаться существенно завышенными по сравнению с реальными погрешностями, имеющими случайный характер. Количественные оценки такого рода погрешностей приведены в следующем разделе (5.2.2), и в отличие от численных методов исследования в настоящем разделе оценка случайных погрешностей дается в аналитическом виде на основе функции двух переменных (y и z), представленной произведением двух независимых функций

$$\Delta C_{и}(y, z) = \Delta C_{и}^{ext}(y) \cdot \Phi(z), \quad (5.6)$$

где $\Phi(z)$ изображена на рис. 5.3.

Экспериментальные исследования, проведенные на автоматизированном градуировочном устройстве [29] с использованием лопатки, применяемой в компрессоре, показали, что форма функции $\Delta C_{и}(y, z)$ остается постоянной при изменении РЗ (y). Иначе говоря, с изменением РЗ (y) изменяется только экстремальное значение этой функции. Это означает, что в нормированном виде эта функция не зависит от РЗ (y) и определяется только функцией $\Phi(z)$ $\left(\Phi(z) = \frac{\Delta C_{и}(y, z)}{\Delta C_{и}^{ext}}\right)$, что существенно упрощает анализ случайной

погрешности дискретизации в разделе 5.2.2 (кроме того, отпадает необходимость исследования влияния на искомые погрешности изменений РЗ (y)).

5.2.2. Случайная погрешность дискретизации

Случайный характер погрешности дискретизации связан с отсутствием синхронизации между процессом вращения РК и импульсным питанием ИЦ, а также поступлением кодов с ее выхода. Оценка величины такой погрешности зависит от формы огибающей кодов при прохождении лопаткой ЧЭ ОВТД, частоты импульсов питания ИЦ и скорости вращения РК.

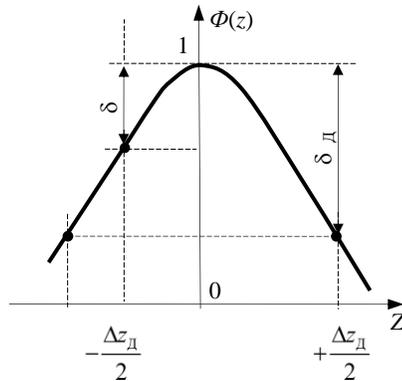


Рис. 5.5. Погрешности дискретизации – случайная (δ) и максимально возможная ($\delta_{\text{д}}$) в окрестности экстремума функции $\Phi(z)$

Для оценки случайной погрешности предполагается, что функция $\Phi(z)$ (выражения 5.5, 5.6) является четной и окрестность ее экстремума ($\Phi(z) > 0,5$) описывается известной функцией Гаусса [30].

$$\Phi(z) = \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right], \quad (5.7)$$

где σ_z параметр, характеризующий ширину функции Гаусса (для рассматриваемой компрессорной лопатки $\sigma_z \approx 3,2$ мм).

На рис. 5.5 представлена окрестность экстремального значения ($\Phi(0) = 1$) в зоне между двумя соседними отсчетами кода ИЦ. Показано, что искомая погрешность дискретизации в окрестности экстремума распределена в диапазоне $0 < \delta \leq \delta_{\text{д}}$, где $\delta_{\text{д}}$ согласно (5.4) и (5.5) – максимальная погрешность дискретизации.

Для малых значений $\Delta z_{\text{д}}$, при которых $\delta_{\text{д}}$ не превышает величину 5%, в выражении (5.7) можно ограничиться первым членом разложения в степенной ряд

$$\Phi(z) \approx 1 - \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2, \quad (5.8)$$

что существенно упростит дальнейший анализ.

При вращении РК, реальное положение экстремального отсчета, определенного на каждом периоде вращения, будет смещено (рис. 5.5) относительно идеализированного экстремума ($z = 0$) на случайную величину $|\Delta z| \leq \Delta z_{\text{д}}/2$, что является источником погрешности дискретизации

$$\delta = 1 - \Phi(\Delta z). \quad (5.9)$$

Для установившегося режима вращения РК ($N_{\text{ПК}} \approx \text{const}$), принимая гипотезу, что положение экстремума на интервале дискретизации равновероятно, по известной методике определения закона распределения функции (5.9) случайного аргумента [30], получено выражение плотности вероятности погрешности дискретизации

$$W(\delta) = \frac{1}{2\sqrt{\delta_{\text{д}}} \cdot \sqrt{\delta}},$$

где $\delta_{\text{д}}$ определяется из (5.4) с учетом (5.8):

$$\delta_{\text{д}} \approx \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{\pi R}{n_{\text{л}} k_{\tau} \sigma_z}\right)^2.$$

Следует отметить, что распределение $W(\delta)$ является усеченным по границе максимальной погрешности и справедливо только для конкретной скорости вращения РК и частоты дискретизации.

На основе плотности вероятности могут быть определены другие статистические характеристики для погрешности дискретизации и, в частности, математическое ожидание (МО, m_d) и среднеквадратическое отклонение (СКО, S_d):

$$m_d = \frac{\delta_{\text{д}}}{3}, \quad S_d = \frac{2\delta_{\text{д}}}{\sqrt{45}}.$$

На рис. 5.6 приведены зависимости МО (m_d) и СКО (S_d) от скорости вращения РК компрессора для тех же исходных данных ($R = 500$ мм, $f_{\text{н}} = 0,5; 1; 2$ МГц), что использовались для оценки максимальной погрешности в разделе 5.2.1.

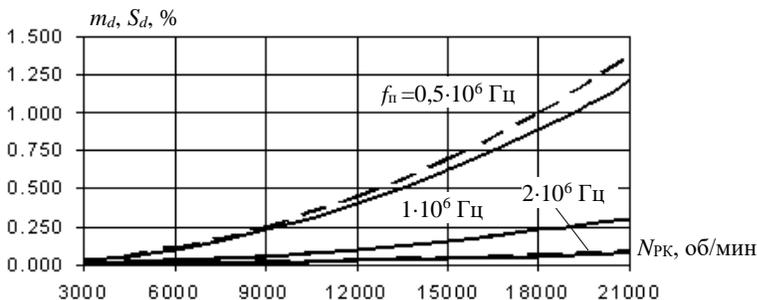


Рис. 5.6. СКО S_d (сплошные линии) и математическое ожидание m_d (пунктир) случайной погрешности дискретизации в зависимости от частоты f_n и скорости вращения $N_{РК}$

Как видно из представленных на рис. 5.6 графиков, указанные характеристики существенно зависят от частоты импульсного питания и скорости вращения РК, квадратично возрастая с ее увеличением. При этом для частоты $f_n = 1,2 \cdot 10^6$ Гц графики S_d и m_d почти совпадают.

Заключение к разделу 5

Исследовано влияние эффекта «недокомпенсации» температурных воздействий на ОВТД. Показано, что экстремальные значения разности кодов, определяемые в системе, соответствуют разности экстремальных значений кодов, которая зависит от дробных множителей и, как следствие, от температурных изменений информативного параметра ОВТД. Это означает, что ФП системы также зависят от температуры и согласно результатам вычислительных экспериментов максимальное отличие ФП при нормальной (20 °С) и номинальной (620 °С) температурах, характеризующее погрешность «недокомпенсации», составляет более 6%. Предложен способ уменьшения такой погрешности, который предусматривает умножение найденной в системе разности кодов на безразмерное число, зависящее от температуры в проточной части компрессора. Показано, что при номинальной температуре способ обеспечивает уменьшение погрешности «недокомпенсации» почти на два порядка.

Исследованы погрешности дискретизации, связанные с изменениями частоты импульсного питания ИЦ, а также скорости вращения РК компрессора. Получены количественные оценки максимально возможной и случайной погрешности дискретизации.

Оценка максимально возможной погрешности производится на основе существующей методики, предусматривающей моделирование зависимости разностного кода от координаты z с минимальным шагом до 0,005 мм. Моделирование производится в два этапа – на первом определяется зависимость информативного параметра ОВТД от z (модель ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки компрессора с последующим пересчетом индуктивности ЧЭ в первичную обмотку СТ ОВТД), на втором – определяется искомая зависимость разностного кода от z (модель ИЦ).

Результаты моделирования представлены в табличном и графическом виде и показывают, что погрешность монотонно возрастает с увеличением скорости вращения РК и уменьшением частоты импульсного питания. Ее минимум составляет менее 0,01% при скорости 3000 об/мин и частоте 2,5 МГц, а максимум – около 5% при скорости 21000 об/мин и частоте 0,5 МГц.

Случайный характер погрешности дискретизации связан с отсутствием синхронизации между процессом вращения РК и частотой импульсного питания ИЦ и соответствующих отсчетов АЦП на ее выходе. Для количественной оценки такой погрешности используется зависимость кода от координаты z (полученная путем моделирования), которая в области экстремума предполагается четной и выражается известной функцией Гаусса. С учетом ряда упрощающих допущений, в том числе о замене функции Гаусса двумя первыми слагаемыми степенного ряда, получено выражение плотности вероятности погрешности дискретизации, а на его основе такие статистические характеристики, как МО и СКО. Приведены зависимости МО и СКО от скорости вращения РК и частоты импульсного питания ИЦ, характер изменения которых аналогичен характеру изменений максимально возможных погрешностей дискретизации. Показано, что максимальное значение МО и СКО не превышает 1,5% и 1,25% соответственно при скорости вращения РК 21000 об/мин и частоте $0,5 \cdot 10^6$ Гц.

РАЗДЕЛ 6

ДЕЙСТВУЮЩИЙ МАКЕТ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматриваются технические и программные средства, в которых реализованы принципы построения системы (на основе методов измерения и обработки информации о РЗ), обеспечивающие функциональные возможности системы и ее характеристики.

Приведены результаты экспериментальных исследований метрологической состоятельности и работоспособности действующего макета системы. Даны количественные оценки систематической и случайной составляющих погрешностей (в статике). Данные о работоспособности получены в динамике в процессе вращения РК компрессора и сравнения заданных значений РЗ с теми РЗ, что определены в системе. Приведены также результаты проверки эффективности работы системы в режиме усреднения полученных результатов на нескольких периодах вращения РК для уменьшения случайных погрешностей [27].

6.1. Технические средства и программное обеспечение

В состав системы входят нестандартные и стандартные технические средства (ТС) (рис. 6.1). В состав стандартных ТС входит ДЧВ, устройства нормализации (УН) сигналов ТП и ДЧВ, МК STM32F407VGT6B [31], а также ПЭВМ. Нестандартные средства включают ОВТД с двумя встроенными термомпарами (ТП₁ и ТП₂), предназначенными для дополнительной

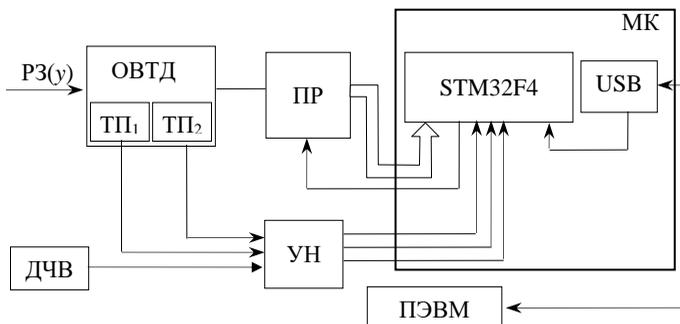


Рис. 6.1. Технические средства системы измерения РЗ

термокоррекции¹⁶, преобразователь (ПР), представляющий собой ИЦ с дифференциальной схемой на входе, в которую включен ОВТД и его имитатор, преобразователи «ток-напряжение», масштабирующий усилитель и десятиразрядный АЦП на выходе. ПР встроен в линию связи между ОВТД и МК.

Связь с ПЭВМ верхнего уровня осуществляется по каналу USB. С выходов УН напряжения, соответствующие выходным напряжениям ТП₁ и ТП₂, поступают на коммутатор и далее АЦП в составе УВВ МК, а нормализованная последовательность импульсов ДЧВ – на дискретный вход УВВ МК для измерения скорости (периода) вращения РК (раздел 3.1).

Перечисленные в разделе 3.2 алгоритмы реализованы ресурсами одного МК на аппаратно-программном уровне. При этом в составе МК задействованы следующие периферийные устройства: модуль таймера, модуль АЦП, устройство операций с числами с плавающей точкой и контроллер прерываний.

Для синхронизации исполнения последовательности алгоритмов с процессом вращения РК используются два уровня прерываний. Прерывания с высоким приоритетом привязаны к началу каждого периода вращения и определяют начало нумерации лопаток РК. Они инициируются сигналами ДЧВ. В обработчике прерывания фиксируется момент времени начала очередного периода.

¹⁶ Согласно способу, изложенному в [3], ТП₁ и ТП₂ обеспечивают повышенную точность измерения температуры в проточной части, которая используется в процессе обработки данных в системе измерения, позволяющей, в частности, уменьшить влияние температуры контролируемой и соседних лопаток, а в конечном счете повысить достоверность информации о РЗ.

Прерывания с более низким приоритетом синхронизируют процессы обработки кодов ИЦ для последовательности лопаток. Инициативные сигналы для данных прерываний вырабатываются адаптивно по факту прохождения каждой лопаткой участка зоны ЧЭ ОВТД и уверенной фиксации экстремального разностного кода контролируемой текущей лопатки. В обработчике прерывания происходит фиксация отсчета времени для контроля опасных состояний лопаток (раздел 1.3), а также выполняются операции накопления усредняющих сумм экстремальных значений разностных кодов и зафиксированных отсчетов времени по каждой лопатке за несколько периодов вращения РК.

Для регистрации моментов реального времени используется модуль таймера в режиме «захват» по двум соответствующим каналам. По первому каналу - для измерения периода вращения РК по сигналам ДЧВ, по второму – для фиксации отсчетов времени для контроля опасных состояний лопаток. Контроль температуры ОВТД и соответствующих кодов АЦП УВВ МК выполняется периодически во время прохождения межлопаточных промежутков, одновременно с определением усредненного межлопаточного кода.

Таким образом, операции, предусмотренные соответствующими алгоритмами, выполняются комплексно в реальном времени. Полученный массив усредненных кодов лопаток передается на верхний уровень в ПЭВМ. В составе действующего макета системы измерения ПЭВМ (рис. 6.1) используется для расчета физических значений РЗ, который производится аналогично тем, что используются в системах для экспериментальных исследований ГТД в стендовых условиях [1, 2].

6.2. Метрологические показатели

Рассматриваются два показателя – систематическая и случайная составляющие погрешности действующего макета системы.

Для количественной оценки систематической составляющей необходима ГХ, т.е. ФП, но полученная экспериментально с помощью трехкоординатного градуировочного устройства, оснащенного механическими индикаторами часового типа с разрешающей способностью 0,01 мм, контролирующими перемещение лопатки, закрепленной на подвижной платформе.

Методика получения ГХ предусматривает предварительную установку заданных РЗ (координат y), а затем ручной поиск экстремального значения

кода C_1 (по координате z). Процедура повторяется с заданным шагом $\Delta y_{ш}$ во всем диапазоне ($0,5 \div 2,5$ мм), а при $y \gg 2,5$ ($y \rightarrow \infty$) фиксируется код C_{II} и вычисляются искомые разности кодов $\Delta C^{ext}(y)$. Однако для анализа систематической составляющей погрешности представляется более удобной функция, обратная полученной ГХ $\Delta C^{ext}(y)$:

$$y = F(\Delta C^{ext}) = \sum_{i=0}^I A_i \Delta C^{ext} \quad , \quad (6.1)$$

где A_i - коэффициенты полинома, I - его степень.

При этом аппроксимированные ГХ используются как «опорные» для определения систематической составляющей погрешности, которая находится как разность заданного РЗ и вычисленного РЗ после аппроксимации (y_a) согласно (6.1):

$$\Delta y = y - y_a \quad . \quad (6.2)$$

Следует отметить, что для получения ГХ действующего макета (функции вида (6.1)) достаточно эксперимента, проводимого только в нормальных температурных условиях. Отличительные особенности эксперимента состоят в том, что функция $C_1(y)$ определяется с небольшим шагом 0,2 мм при вычислении разности $\Delta C = C_{II} - C_1$ на каждой позиции y , а также с повторением перечисленных операций 10 раз и последующим усреднением полученных результатов ΔC . Усредненная ГХ системы представлена в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Усредненная ГХ ($\Delta \bar{C}^{ext}(y)$)

y , мм	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5
$\Delta \bar{C}^{ext}(y)$	340,27	260,75	203,91	162,78	130,35	105,30	85,87	71,00	59,16	49,42	41,37

Эти усредненные значения ($\Delta \bar{C}^{ext}(y)$) используются для определения аппроксимирующей функции вида (6.1). Результатом аппроксимации является полиномиальная функция $y_a(\Delta \bar{C}^{ext})$. Степень $I = 6$, коэффициенты полинома: $A_0 = 4,2255955938$; $A_1 = -6,1557237945 \cdot 10^{-2}$; $A_2 = 6,1365638609 \cdot 10^{-4}$;

$$A_3 = -3,7526730997 \cdot 10^{-6}; \quad A_4 = 1,3236791821 \cdot 10^{-8}; \quad A_5 = -2,4719351918 \cdot 10^{-11}; \\ A_6 = 1,8893005772 \cdot 10^{-14}.$$

Приведенная систематическая составляющая погрешности:

$$\delta_y = \frac{\Delta_y}{\Delta y_{\max}} \cdot 100\% . \quad (6.3)$$

где Δ_y определяется с помощью выражения (6.2), $\Delta y_{\max} = 2$ мм – максимально возможное изменение РЗ, причем Δ_y вычисляется по заданным значениям РЗ (y) в «узлах» табл. 6.1 и значений y_a , найденных с помощью выражения (6.2)¹⁷. Результаты расчета показывают, что систематическая составляющая погрешности δ_y во всем диапазоне изменений РЗ (y) невелика и ее максимальное значение не превышает 0,06%.

Известно, что погрешности аппроксимации при использовании степенных полиномов в промежутках между «узлами» могут быть намного больше, чем в «узлах». Для оценки таких погрешностей экспериментально получены значения разности $\Delta \bar{C}^{ext}(y)$ (они приведены в табл. 6.2 при значениях РЗ (y), выбранных в центрах промежутков между координатами y , приведенными в табл. 6.1). После вычислений значения y_a для тех же координат y были получены погрешности δ_y . Они значительно больше погрешностей в «узлах», но максимальное значение не превышает 0,26%.

Таблица 6.2. Значения $\Delta \bar{C}^{ext}(y)$ в центрах промежутков между «узлами» ГХ

y , мм	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
$\Delta \bar{C}^{ext}(y)$	297,61	231,34	182,88	144,82	116,97	94,47	77,99	64,81	53,84	45,16

Эксперимент по оценке случайной составляющей погрешности проводится в фиксированной позиции лопатки относительно ЧЭ ОВТД при РЗ (y), равном 0,5 мм. Анализ фрагмента выборки объемом 105 кодов C_1 показал, что большая часть кодов остается в пределах разброса в 5 единиц (СКО 1,11). В

¹⁷ В такой редакции систематическая составляющая – это фактически погрешность аппроксимации.

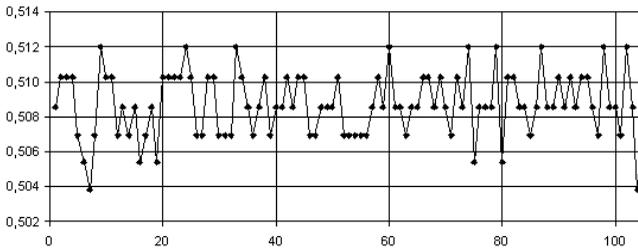


Рис. 6.2. Выборка вычисленных PЗ (y) при заданном значении $y = 0,5$ мм

системе измерения PЗ (y) случайная погрешность кода C_{II} практически устраняется благодаря статистической обработке с помощью гистограммы. Поэтому СКО разности кодов ΔC^{ext} будет иметь то же значение, что и для C_I . При этом приведенная случайная составляющая погрешности определяется отношением СКО к изменению разностного кода в диапазоне PЗ от 0,5 до 2,5 мм. Согласно данным в табл. 6.2 эти изменения составляют около 300 единиц кода, и при СКО 1,11 приведенная случайная составляющая погрешности оценивается примерно в 0,3%.

Возвращаясь к выборке кодов C_I по известным значениям \bar{C}_{II}^{ext} можно вычислить соответствующее выборке значение ΔC^{ext} , а с помощью полинома (6.1) пересчитать ΔC^{ext} в PЗ (y). Полученные результаты представлены на рис. 6.2. При пересчете на PЗ эта погрешность существенно уменьшается, что связано с повышенной кривизной функции $\Delta C^{ext}(y)$ в области $y = 0,5$ мм. СКО значений PЗ (y) составляет 0,00184 мм. Его относительное значение, приведенное к диапазону изменений 2 мм, составляет около 0,1%.

6.3. Оценка работоспособности действующего макета системы

Для оценки работоспособности используется имитация объекта с помощью РК реального компрессора и его электропривода. Имитация предусматривает три серии экспериментов. В первой серии исследуются изменения во времени кодов на выходе ИЦ в процессе вращения РК и результаты усреднения кодов межлопаточных промежутков, демонстрируется нестационарность вращения РК и разброс кодов на выходе ИЦ, имеющий случайный характер.

Во второй серии имитируются изменения РЗ между статором и торцами лопаток РК компрессора, и определяется разность заданных значений РЗ и РЗ, полученных по результатам обработки данных в системе (в процессе эксперимента скорость вращения РК остается постоянной).

Цель третьей серии – подтверждение эффективности уменьшения случайных погрешностей, связанных в основном с неустранимыми помехами в ИЦ и процессом дискретизации (в этой серии осуществляется имитация скоростей вращения РК в диапазоне от 2000 до 20000 об/мин, но при этом реальная скорость вращения РК остается постоянной и равной 200 об/мин).

С учетом специфических особенностей планируемых экспериментов изложению полученных результатов предшествует краткое описание используемого оборудования для имитации изменений РЗ между статором и торцами лопаток РК в компрессоре, а также имитации повышенных скоростей вращения РК на реально низкой и постоянной (200 об/мин) скорости, что объединяется общим заголовком раздела 6.3.1.

6.3.1. Имитация объекта

На рис. 6.3 представлено схематическое изображение РК с лопаточным венцом и ОВТД, ЧЭ которого находится на расстоянии РЗ от торцевой части контролируемой лопатки. Предполагается, что благодаря специальному механизму производится перемещение ОВТД по координатной оси Y системы отсчета $OXYZ$, имитирующее возможные изменения РЗ в процессе работы компрессора (в экспериментах используется РК реального компрессора с электроприводом – двигателем постоянного тока с возможностью регулирования скорости вращения до 500 об/мин (скорость ограничена по соображениям безопасности)). Изменения РЗ в диапазоне 0,75 – 2,5 мм контролируются индикатором часового типа с разрешающей способностью 0,01 мм (на рис. 6.3 индикатор не показан).

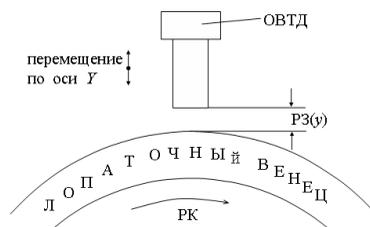


Рис. 6.3. Схематическое изображение РК с лопаточным венцом и ОВТД

Для имитации скорости вращения в расширенном диапазоне (2000–20000 об/мин) предлагается использование пропорции подобия – равенства числа отсчетов кодов на выходе ИЦ (M_0) за полный период вращения РК при скорости вращения N_0 в реальных условиях работы компрессора и в планируемых экспериментах при скорости $N_э$.

Число отсчетов в реальных условиях определяется выражением $M_0 = \frac{60 \cdot f_0}{N_0}$, где f_0 – частота импульсного питания ИЦ и кодов на ее выходе.

Для имитации реальных условий полученное число отсчетов необходимо воспроизвести в планируемых экспериментах. При этом можно записать равенство

отношение $\frac{60 \cdot f_0}{N_0} = \frac{60 \cdot f_э}{N_э}$, из которого следуют пропорции подобия

$\frac{N_0}{N_э} = \frac{f_0}{f_э} = K_э$, где $f_э$ – частота кодов на выходе ИЦ, необходимая в планируемых экспериментах, $K_э$ – масштабный коэффициент подобия.

Необходимо учитывать, что ИЦ штатно работает на постоянной частоте $f_э = const$, которая для регулирования недоступна. Поэтому требуемая скорость вращения РК равная N_0 может имитироваться только путем прореживания входной последовательности кодов в $K_э$ раз. Коэффициент $K_э$ является целым числом. Например, при $K_э = 10$, прореживание означает, что из каждых 10-ти отсчетов кода, 9 отсчетов утилизируются, а 10-й – фиксируется в массиве полезных кодов для дальнейшей обработки.

В табл. 6.3 приведены расчетные данные для имитации расширенного диапазона скорости вращения РК для ИЦ, работающей на частоте импульсного питания $f_0 = 1$ МГц. При этом фактическая скорость вращения РК ($N_э$) задана постоянной и равной 200 об/мин, а частота кодов на выходе ИЦ понижена до 0,1 МГц. Данные в табл. 6.3 могут быть использованы как для фиксированной (дискретной) настройки, так и для задания нужного диапазона скорости вращения с плавной (аналоговой) перестройкой внутри него. Однако в настоящей работе использовалась только фиксированная настройка.

Таблица 6.3. Расчетные данные для имитации скорости вращения РК

Скорость вращения N_0 , об/мин	Число отчетов, M_0	Коэффициент подобия, K_{Σ}
2 000	30 000	1
4 000	15 000	2
6 000	10 000	3
8 000	7 500	4
10 000	6 000	5
12 000	5 000	6
14 000	4 286	7
16 000	3 750	8
18 000	3 333	9
20 000	3 000	10

В этом случае необходимо выбрать интересующее фиксированное значение скорости вращения, например, $N_0 = 8000$ об/мин, и в этой строке таблицы получить коэффициент прореживания $K_{\Sigma} = 4$ входной последовательности кодов.

Рассмотренная имитация реализована на программном уровне в МК в виде дополнительной процедуры, вызываемой при опросе АЦП ИЦ. Код коэффициента прореживания K_{Σ} задается набором переключателей на лицевой панели МК.

6.3.2. Изменения кодов на выходе ИЦ в процессе вращения РК

На рис. 6.4 представлены зависимости кодов на выходе ИЦ при прохождении нескольких лопаток ЧЭ ОВТД от времени t номера отчета, при постоянном периоде (10^{-5} с) импульсного питания ИЦ, а также значениях $y = 0,75$ мм (*a*) и 2,25 мм (*b*) и скорости вращения РК 200 об/мин¹⁸.

¹⁸ Представленные на рис. 6.4, *a* и *b* зависимости кодов получены при нормальной температуре. При номинальной температуре эти зависимости сместились бы вверх, и их максимумы оказались бы на уровне верхнего предела кодов 10-разрядного АЦП (1023). Однако соответствующие зависимости разностных кодов $\Delta C = \bar{C}_{\text{ИЦ}}^{\text{ext}} - C(t)$ сохранили свое положение, оставаясь независимыми от изменений температуры.

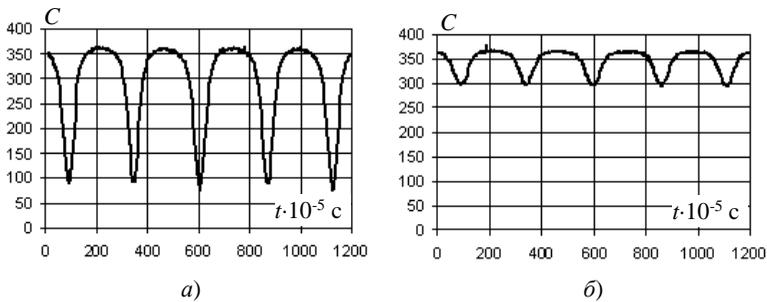


Рис. 6.4. Коды на выходе ИЦ при значениях РЗ (y) 0,75 мм (а) и 2,25 мм (б)

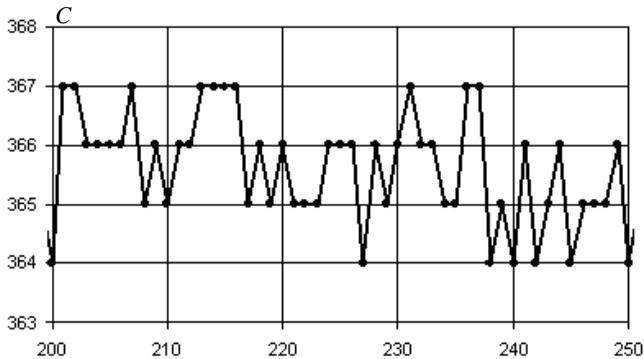


Рис. 6.5. Область $C(t)$ в зоне межлопаточного промежутка

Область $C(t)$ в зоне межлопаточного промежутка (максимума) изображена на рис. 6.5. Помехи в межлопаточном промежутке устраняются при помощи метода и реализующего его алгоритма (разделы 1.2. и 3.2), предусматривающих построение гистограммы с объемом выборки не менее полного периода вращения РК.

Одна из таких экспериментально полученных гистограмм (при $y = 2,25$ мм) и пример разброса полученных таким образом кодов C_{II} в межлопаточном промежутке приведены на рис. 6.6, а и б соответственно. Как видно

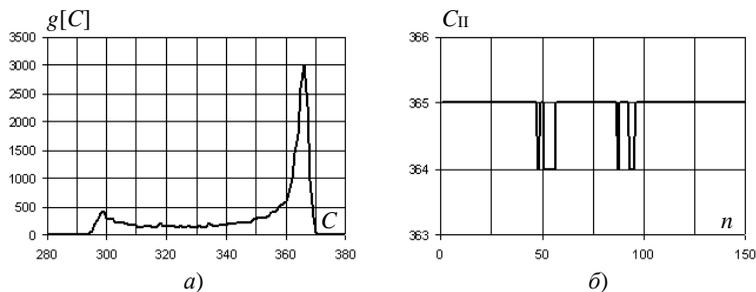


Рис. 6.6. Гистограмма кодов за полный период вращения РК (а) и пример разброса полученных кодов C_{II} на n периодах вращения РК (б)

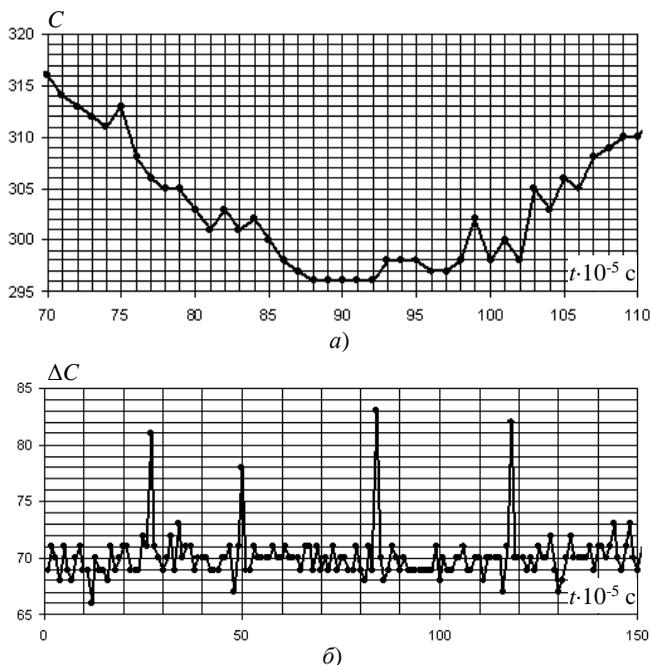


Рис. 6.7. Область $C(t)$ в зоне прохождения ЧЭ ОВТД контролируемой лопаткой (минимума) (а) и пример случайного разброса ΔC в той же зоне (б)

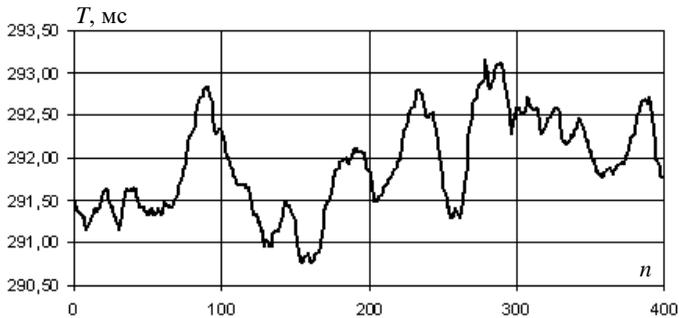


Рис. 6.8. Нестационарность процесса вращения РК

из рис. 6.6, б помехи в межлопаточном промежутке практически полностью устранены.

Для визуальной оценки помех область $C(t)$ в зоне экстремума C_1 (минимума) показана на рис. 6.7, а, а пример случайного разброса найденных разностей ΔC (после вычитания кода C_1 из кода C_{II} , полученного с помощью гистограммы при $y = 2,25$ мм) – на рис. 6.7, б. Представляется очевидным, что выявленный разброс экстремальных значений кодов, связанный с помехами, может быть существенно уменьшен, если использовать предусмотренное в системе усреднение разностных кодов по каждой лопатке за несколько периодов вращения РК.

С целью оценки стабильности скорости вращения РК при фиксированном значении $N_{\text{э}} \approx 200$ об/мин, были проведены эксперименты по выявлению нестационарности за определенное число периодов вращения РК. График временного тренда периодов за 400 полных периодов вращения РК (n) представлен на рис. 6.8. Показано, что среднее значение периода составляет 291,91 мс, чему соответствуют фактическая средняя скорость 205,54 об/мин. При этом СКО процесса составляет 0,19% от указанного среднего значения периода. Для серии подобных экспериментов было получено СКО в диапазоне от 0,09% до 0,21%.

6.3.3. Оценка работоспособности системы по разности заданных и вычисленных значений РЗ

Представляется очевидным, что наличие РК с электроприводом, механизма перемещения ОВТД (рис. 6.3), контролируемого индикатором (его разрешающая способность 0,01 мм) обеспечивает возможность получения ГХ ($y = f(\Delta C)$) не только в статическом состоянии РК, но и в динамике (т.е. в процессе его вращения). Разумеется, использование динамического режима получения ГХ не может рассчитывать на официальную аттестацию и гарантировать метрологическую состоятельность результатов эксперимента. Однако возможность его применения для оценки работоспособности технических и программных средств системы измерения не вызывает сомнений.

При этом для получения ГХ осуществляется установка заданных значений РЗ (координаты y) в диапазоне от 0,75 мм до 2,25 мм с шагом 0,5 мм. Для каждого значения y в процессе вращения РК для лопатки под номером l определяются экстремальные значения разности кодов ΔC^{ext} . Полученные ГХ в виде функции $y = f(\Delta C^{ext})$ аппроксимируются полиномом третьей степени, коэффициенты которого вводятся в систему для использования в программе, реализующей вычисление искомых РЗ (y).

Далее с помощью индикатора устанавливаются значения y , которые являются промежуточными между значениями, использованными при получении ГХ (между «узлами» таблиц ГХ), и производится вычисление РЗ в системе измерения.

Разность заданных и вычисленных значений РЗ (y), выраженная в процентах от диапазона изменений РЗ ($\Delta y = 1,5$ мм), оказалась равной примерно 1% для РЗ 1,5 и 2,0 мм и около 5% для РЗ 1,0 мм. Полученные результаты подтверждают работоспособность технических и программных средств системы.

6.3.4. Оценка работоспособности усреднения разностных кодов на нескольких периодах вращения РК для уменьшения случайных погрешностей

В заключительной серии экспериментов демонстрируется эффективность усреднения разностных кодов на нескольких периодах вращения РК.

Как было показано в процессе метрологических исследований (раздел 6.2), СКО случайной погрешности составляет около единицы кода, а приведенная погрешность в диапазоне изменений РЗ от 0,5 до 2,5 мм, которому

соответствуют изменения разностного кода около 300 единиц, составляла примерно 0,3%.

Проведение экспериментов с вращающимся РК вызывает необходимость увеличения нижней границы РЗ до 0,75 мм. Если предположить, что диапазон изменений РЗ 2,0 мм и соответствующие ему изменения кода снижаются с 300 единиц до 200, то приведенная случайная погрешность возрастает до 0,5% (примерно в 1,7 раза).

Подобное увеличение относительной случайной погрешности, выраженной отношением СКО к текущим значениям разностного кода, будет происходить и при оценке таких погрешностей по мере приближения к верхней границе РЗ, где величина разностного кода достигает минимума. Если в соответствии с ГХ при РЗ, равном 2,25 мм и разностном коде около 50 (раздел 6.2) СКО по-прежнему единица, то относительная погрешность возрастает почти до 2%. Более того, как показали результаты исследований, приведенные в разделе 6.3.2, в процессе вращения РК от электропривода возникают дополнительные помехи в ИЦ, вызывающие повышенный разброс разностного кода, составляющий четыре, а единичные выбросы – десять единиц кода и выше (рис. 6.7, б). Кроме того, свой вклад в относительную случайную погрешность вносит нестационарность периода вращения РК (рис. 6.8), а также случайная составляющая погрешности дискретизации, которая, как показали исследования, в наибольшей степени проявляется на повышенной скорости вращения РК (раздел 5.2.2).

С учетом изложенного эффективность усреднения разностных кодов для уменьшения случайных погрешностей наиболее целесообразно исследовать на верхней границе диапазона изменений РЗ, где относительная погрешность наиболее велика.

Вместе с тем, для сравнения полученных результатов необходимо проведение таких же исследований и на нижней границе (при РЗ равном 0,75 мм). При этом обе серии экспериментов сводятся к одной задаче – определению числа периодов вращения РК, необходимых для получения относительной случайной погрешности, не превышающей заданный уровень.

В обеих сериях экспериментов заданный уровень погрешности был выбран равным 0,2%, а имитируемые скорости вращения РК составляли 2000, 10000 и 20000 об/мин.

В первой серии экспериментов (при $R_3 = 0,75\text{мм}$), где уровень относительной погрешности приближается к приведенной, для получения заданной случайной погрешности 0,2% оказалось достаточным 10 периодов вращения на скорости 2000 об/мин, 12 на скорости 10000 об/мин и 25 на 20000 об/мин.

Результаты второй серии экспериментальных исследований на верхней границе ($R_3 = 2,25\text{ мм}$), где уровень относительной погрешности существенно возрастает, коренным образом отличаются от результатов первой серии. Уже на скорости 2000 об/мин число усреднений возрастает более чем на порядок и достигает 157 периодов, а на 20000 об/мин – 175. Можно предположить, что на повышенных скоростях вращения РК возрастает влияние случайной погрешности дискретизации, которая практически отсутствует на низких скоростях, где преобладает влияние случайных погрешностей, связанных с неустранимыми помехами в ИЦ.

Приведенные выше результаты экспериментов могли бы быть получены в обеих сериях «методом проб и ошибок», который потребовал бы серьезных временных затрат, возрастающих с уменьшением уровня заданной погрешности.

Поэтому использовался способ определения необходимого числа усреднений разностных кодов для получения заданной случайной погрешности, описание которого приведено в работах [32, 33], а полученные результаты были проверены экспериментально. Отклонение от заданной погрешности в первой и во второй серии не превышали -0,03%.

Представляется очевидным, что с увеличением числа периодов вращения РК, необходимых для усреднения разностных кодов и достижения заданной точности, возрастает длительность процесса измерения. Согласно полученным экспериментальным данным на нижней границе диапазона изменений R_3 (0,75 мм) при максимальной скорости вращения РК и обновлении информации о R_3 на каждом периоде вращения, равном 0,003 с, длительность возрастает в 25 раз, но составляет всего лишь 0,075 с (менее 0,1с). На верхней границе R_3 (2,25 мм) при той же скорости вращения РК и 175 периодах усреднения время измерения возрастает, но остается менее 1 с (0,525 с).

Согласно экспериментальным данным, полученным на нижней границе диапазона изменений R_3 и пониженной скорости вращения РК до 2000 об/мин для заданной случайной погрешности (не более 0,2%) достаточно усреднения

на 10 периодах вращения РК, что соответствует времени измерения 0,3 с. Однако на верхней границе диапазона измерений РЗ для получения того же значения погрешности (0,2%) требуется 157 периодов вращения РК, и время измерения возрастает почти до 5 с (4,71 с).

Практически те же результаты по числу периодов вращения РК для заданной погрешности 0,2% можно ожидать в экспериментах при скорости вращения РК 3000 об/мин – на нижней границе около 10 и на верхней примерно 160, а соответствующие интервалы времени, при которых производится усреднение, окажутся равными 0,2 и 3,2 с.

Если предположить, что объектом диагностики опасных состояний является компрессор ГТД, используемый в электроэнергетике для вращения ротора генератора с постоянной скоростью 3000 об/мин, то появление сигнала, свидетельствующего, например, об обнаружении предпомпажного состояния с задержкой в 0,2 с, представляется вполне приемлемым (с учетом, что измерение происходит на нижней границе при малых значениях РЗ). Поскольку задержка на верхней границе возрастает более чем на порядок (до 3,2 с), то ее снижение возможно повышением уровня заданной погрешности. Такой размен вполне допустим, если обнаруживаемые изменения РЗ происходят вблизи верхней границы, где они менее опасны.

Заключение к разделу 6

Разработаны ТС и ПО системы измерения РЗ, в которой реализованы принципы построения системы на уровне структурно-функциональной схемы (с обозначениями на ней ТС) и алгоритмов функционирования. Изготовлен действующий макет системы, предназначенный для экспериментальной проверки метрологической состоятельности и работоспособности системы. Отличительная особенность ТС системы и ее действующего макета – наличие МК (STM32F407VGT6B) с повышенным быстродействием и расширенным объемом памяти. ПО МК функционирует в реальном времени в соответствии с алгоритмами, обеспечивающими самокомпенсацию температурных воздействий на ОВТД и усреднение разностных кодов на нескольких периодах вращения РК (для уменьшения случайных погрешностей).

Проведены экспериментальные исследования метрологических показателей системы. При этом для определения систематической составляющей

погрешности используется ГХ, аппроксимированная полиномиальной функцией, а погрешность находится как разность заданного и вычисленного РЗ (y). Показано, что приведенная систематическая составляющая погрешности в диапазоне изменений РЗ от 0,5 до 2,5 мм не превышает 0,06% в «узлах» градуировочной таблицы, но достигает 0,26 % в промежутках между «узлами». Показано также, что приведенное значение случайной составляющей погрешности, найденное при минимальном РЗ (0,5 мм) как отношение СКО к максимальному разностному коду (в том же диапазоне изменений РЗ) составляет около 0,3%. Погрешность уменьшается до 0,1% при пересчете СКО в изменение РЗ (y) с помощью ГХ, аппроксимированной полиномиальной функцией (что связано с повышенной крутизной ГХ при РЗ 0,5 мм).

Оценка работоспособности действующего макета производилась на экспериментальной установке в процессе вращения РК реального компрессора от электропривода (двигателя постоянного тока). Измерения РЗ (y) имитировались перемещением ОВТД относительно торцов лопаток, которое контролировалось индикатором перемещений часового типа с разрешающей способностью 0,01 мм. Имитация скорости вращения РК в диапазоне 2000÷20000 об/мин при реальной скорости вращения РК 200 об/мин (выбранной по соображениям безопасности) обеспечивалась соответствующим снижением частоты дискретизации (прореживания кодов АЦП на выходе ИЦ).

Приведены результаты исследований изменений кодов на выходе ИЦ во времени в процессе вращения РК при РЗ (y) 0,75 и 2,25 мм, демонстрируются форма, амплитуда и частота появления помех в ИЦ, эффективность усреднения кодов межлопаточных промежутков с помощью гистограммы, а также даются количественные оценки нестабильности периодов вращения РК, которые могут быть одной из возможных причин появления случайной погрешности.

При проверке работоспособности действующего макета системы в процессе вращения РК по упрощенной методике, не претендующей на метрологическую состоятельность, снималась ГХ (ограниченное число точек, низкая степень аппроксимирующего полинома), которая вводилась в ПЭВМ системы для вычисления физических значений РЗ. Показано, что разность заданных и вычисленных РЗ, отнесенная к диапазону изменений РЗ (0,75 – 2,25 мм), не превышает единиц процентов, что свидетельствует о работоспособности ТС и ПО системы. Кроме того, благодаря возможности имитации переменной и

повышенной скорости вращения РК исследована возможность понижения случайных погрешностей измерения РЗ на нескольких периодах вращения РК. Показано, что при заданной относительной случайной погрешности 0,2% (отношение СКО разностного кода, связанного с действием неустранимых помех в ИЦ и дискретизацией, к текущему значению этого кода) достаточно 10 периодов вращения РК, если частота импульсного питания 1 МГц и скорость вращения РК 2000 об/мин, а РЗ – 0,75 мм. При той же погрешности (0,2%) необходимо проводить усреднение на 175 периодах вращения РК при 20000 об/мин, той же частоте импульсного питания (1 МГц) и РЗ, равно 2,25 мм. При всех значениях скорости вращения в диапазоне от 2000 до 20000 об/мин, РЗ в диапазоне от 0,75 до 2,25 мм с сохранением частоты импульсного питания, заданных случайных погрешностей (0,2%), число периодов будет находиться в указанном диапазоне от 10 до 175.

Усреднение разностных кодов на нескольких периодах вращения приводит к увеличению длительности измерения РЗ. Даны и количественные оценки времени измерения, которое при малой скорости вращения РК достигает нескольких секунд на верхней границе диапазона изменений РЗ, но может быть уменьшено при увеличении заданного уровня случайной погрешности (что недопустимо на нижней границе при малых значениях РЗ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Методы** и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. –188 с.

2. **Кластерные** методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред. О.П. Скобелева – М.: Машиностроение, 2011. -298 с.

3. **Кластерные** методы и средства измерения радиальных зазоров в проточной части турбины / под общ. ред. Скобелева О.П. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. -224 с.

4. **Пат. 2587644 РФ**, МПК G01B 7/14. Способ измерения радиальных зазоров между торцами лопаток рабочего колеса и статорной оболочкой турбомашин / Белопухов В.Н., Подлипов П.Е., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. №2014154334/28; Заявл. 30.12.2014; Опубл. 20.06.2016, бюл. 17.

5. **Боровик С.Ю., Белопухов В.Н., Кутейникова М.М., Подлипов П.Е., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Способ измерения радиальных зазоров в газотурбинном двигателе с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик // Датчики и системы. – 2018. – №4. –С. 53-59.

6. **Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Подлипов П.Е., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Самокомпенсация температурных воздействий на однорезцовый вихретоковый датчик при измерении радиальных зазоров в компрессоре и турбине // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIX междунар. конф. –Самара: ООО «Офорт». -С. 535-537.

7. **Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Подлипов П.Е., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Методы предварительной обработки информации в системе измерения радиальных зазоров с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик в проточной части ГТД // Проблемы управления и

моделирования в сложных системах. Труды XXI междунар. конф. –Самара: ООО «Офорт», 2019. -С.117-121.

8. **V. Belopukhov, S. Borovik, P. Podlipnov, Y. Sekisov and O. Skobelev** Methods for Preliminary Data Processing in a System for Measuring of Radial Clearances with Self-Compensation of Temperature Effects on the Sensor in Flow Section of Gas-Turbine Engine // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), Samara, Russia, 2019. -pp.649-653. doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976605.

9. **Патент РФ №2651622 RU**, МПК G01B 7/14. Способ измерения радиальных зазоров между торцами лопаток рабочего колеса и статорной оболочкой турбомшины / Белопухов В.Н., Подлипов П.Е., Секисов Ю.Н. – Оpubл. 23.04.18, бюл. №12.

10. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. -М.: Физматгиз, 1962. –560с.

11. **Патент 2273831 РФ**, МПК G01H 17/00 Способ обнаружения помпажа и оценки параметров помпажных колебаний в компрессорах газотурбинных установок / Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. №2004126807/28; Заявл. 06.09.2004; Оpubл. 10.04.2006, бюл. №10.

12. **Боровик С.Ю., Райков Б.К.** Об одном способе диагностики помпажа и оценки его параметров // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды VII междунар. конф. -Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2005. -С.193-196.

13. **Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Способ измерения и обнаружения колебаний лопаток в экспериментальных исследованиях и диагностике срывных и помпажных явлений в компрессорах газотурбинных двигателей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV междунар. конф. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2002, -С.539-545.

14. **Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Подлипов П.Е., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Кластерные методы измерения радиальных зазоров самокомпенсацией температурных воздействий на датчики в проточной части газотурбинных двигателей // XIII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. –М.: ИПУ РАН, 2019. –С. 2698-2703.

15. **Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипов П.Е., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Измерение радиальных зазоров в

газотурбинном двигателе с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик. Семейства функций преобразования датчика и измерительной цепи // Датчики и системы. –2019. –№4. –С.39-46.

16. **Белоухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипов П.Е., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Функции преобразования одновитковых вихретоковых датчиков и измерительных цепей с самокомпенсацией температурных воздействий // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XX междунар. конф. – Самара: ООО «Офорт», 2018. –С.408-409.

17. **S. Borovik, Y. Sekisov.** Single-Coil Eddy Current Sensors and Their Application for Monitoring the Dangerous States of Gas-Turbine Engines // Sensors. -2020. -20. -p.2107. doi:10.3390/s20072107.

18. **Подлипов П.Е.** Интегрированная модель одновиткового вихретокового датчика и компрессорной лопатки формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Труды XIX междунар. конф. -Самара: ООО «Офорт», 2017. –С.562-564.

19. **Беленький Л.Б., Скобелев О. П.** Измерительная цепь с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным дифференцированием // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV междунар. конф. -Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2012. -С.602-606.

20. **Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Модель измерительной цепи с переменными во времени эквивалентными индуктивностями одновитковых вихретоковых датчиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI междунар. конф. -Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014. -С. 692-696.

21. **Белоухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипов П.Е.** Структура и алгоритмы функционирования систем измерения радиальных зазоров с самокомпенсацией температурных воздействий // Вестник СамГТУ, Серия «Технические науки». -2018. -№4 (60). –С. 52-65.

22. **Белоухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипов П.Е., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Принципы построения системы измерения радиальных зазоров с самокомпенсацией температурных воздействий // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XX междунар. конф. –Самара: ООО «Офорт», 2018. –С.405-407.

23. **Подлипов П.Е.** Влияние температуры на контролируемую и соседние лопатки рабочего колеса компрессора при измерении радиальных зазоров с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», 2018, №3(59). – с. 106-117.

24. **Боровик С.Ю., Подлипов П.Е., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Влияние мешающих факторов в системе измерения радиальных зазоров в газотурбинных двигателях с самокомпенсацией температурных воздействий // Автометрия. -2019. -№4. -Т.55. -С.86-98. doi: 10.15372/AUT20190410.

25. **Borovik S.Y., Podlipnov P.E., Sekisov Y.N.et al.** Influence of Disturbing Factors in a System for Measuring Radial Clearances in Gas-Turbine Engines with Temperature Self-Compensation. Optoelectron. Instrument. Proc. -55, -pp.388-398 (2019). doi: 10.3103/S8756699019040101.

26. **Кутейникова М.М., Подлипов П.Е.** Влияние осевых смещений рабочего колеса турбомашин на результаты измерения радиальных зазоров при использовании самокомпенсации температурных воздействий на датчик // Вестник СамГТУ, Серия «Технические науки». -2017. №4 (56). – С.76-84.

27. **Belopukhov V.N., Borovik S.Y., Podlipnov P.E., Sekisov Yu.N., Skobelev O.P.** System for Measuring of Radial Clearances in Gas-Turbine Engine with Self-Compensation of Temperature Effects on the Sensor // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. -2020. -vol. 21. -no. 5. -pp. 294—303. doi: 10.17587/mau.21.294-303.

28. **Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Подлипов П.Е.** Оценка погрешностей дискретизации при определении экстремальных значений кодов в системах измерения радиальных зазоров в компрессорах турбомашин // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». -2018. -№1(57). -С. 47-54.

29. **Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Подлипов П.Е.** Аппаратно-программные средства автоматизации экспериментальных исследований семейств градуировочных характеристик систем измерения координат смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Междунар. конф. -Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014. -С.682-686.

30. **Гурский Е.И.** Теория вероятностей с элементами математической статистики. -М.: «Высшая школа», 1971. –328с.

31. **Datasheet:** <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>.

32. **Белопухов В.Н.** Случайные погрешности измерения радиальных зазоров в турбомашинах и метод их уменьшения // Автометрия. -2020. -№6. (в печати).

33. **Патент РФ № 2651628.** Способ измерения с заданной точностью радиальных зазоров между торцами лопаток рабочего колеса и статорной оболочкой турбомашин при дискретном поступлении информации с датчика / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлипов, Ю.Н. Секисов. Опубл. 23.04.2018, бюл. №12.

Научное издание

БЕЛОПУХОВ ВАЛЕНТИН НИКОЛАЕВИЧ,
БОРОВИК СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ,
ПОДЛИПНОВ ПЕТР ЕВГЕНЬЕВИЧ
И ДР.

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ
И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
О РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРАХ В ПРОТОЧНОЙ
ЧАСТИ ГТД С САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА ДАТЧИК**

Компьютерный набор *Иванова Е.Г.*
Верстка и дизайн *Боровик С.Ю.*

ISBN 978-5-88940-156-8



Подписано в печать 26.04.21. Формат 60x88 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman
Усл. печ. л. 8,25 Уч.-изд. л. 8,17 Тираж 250 экз. Заказ №03/2021



Издательство “Новая техника” - Publisher «New Engineering» LtdРоссия,
443010, Самара, ул.Фрунзе 145 - 145, Frunze Str., Samara, 443010, Russia

ISBN 978-5-88940-156-8



9 785889 401568