

КЛАСТЕРНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ

Под общей редакцией
О.П. Скобелева

МОСКВА
ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
2018

УДК 621.452.3
ББК 31.16
К47



*Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований по проекту №18-18-00057
Издание РФФИ не подлежит продаже*

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

Авторы: В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова,
П.Е. Подлипнов, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

К47 Кластерные методы и средства измерения радиальных зазоров в проточной части турбины / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова и др.; под общ. ред. О.П. Скобелева. — М.: Инновационное машиностроение, 2018. — 224 с., ил.

ISBN 978-5-907104-07-5

Приведено описание предложенных авторами кластерных методов измерения радиальных зазоров в турбине газотурбинного двигателя, предусматривающих использование новых разновидностей высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков. Исследовано электромагнитное взаимодействие чувствительного элемента такого датчика (отрезка проводника) с торцевой частью лопатки и переходные процессы в датчиках, включённых в дифференциальную измерительную цепь с импульсным питанием. Рассмотрены принципы построения системы измерения, реализующей предложенные методы, и результаты исследований возможных погрешностей. Приведено описание технических и программных средств системы, даны экспериментальные оценки её метрологических показателей и работоспособности.

Для специалистов в области измерений, разработчиков газотурбинных двигателей и систем их испытаний, диагностики и управления.

УДК 621.452.3
ББК 31.16

ISBN 978-5-907104-07-5

© Белопухов В.Н., Боровик С.Ю.,
Кутейникова М.М., Подлипнов П.Е.,
Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., 2018

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами
Российской академии наук, 2018

Оглавление

Сокращения.....	5
Введение.....	6
Раздел 1. Новые разновидности высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков и кластерных методов измерения радиальных зазоров в турбинах.....	12
1.1. Высокотемпературные одновитковые вихретоковые датчики для турбины.....	13
1.2. Методы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток.....	16
1.2.1. Метод измерения с фиксацией минимальных значений эквивалентных индуктивностей чувствительных элементов.....	17
1.2.2. Метод измерения с повышенной чувствительностью к радиальным смещениям в расширенном диапазоне осевых смещений торцов лопаток.....	21
Заключение к разделу 1.....	24
Раздел 2. Модели переходных процессов в одновитковом вихретоковом датчике при импульсном питании.....	26
2.1. Модель передачи импульсного напряжения питания через согласующий трансформатор.....	27
2.2. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента и лопатки.....	34
2.3. Модель трансформации эквивалентной индуктивности чувствительного элемента.....	48
2.4. Результаты экспериментальных исследований переходных процессов в датчике.....	51
2.5. Семейства функций преобразования датчиков в составе кластера.....	55
Заключение к разделу 2.....	67
Раздел 3. Исследования измерительных цепей.....	70
3.1. Структурные схемы измерительных цепей и их функционирование.....	74
3.2. Моделирование измерительных цепей.....	79
3.3. Верификация результатов моделирования.....	83
3.4. Результаты исследований измерительных цепей.....	89
3.4.1. Изменения во времени токов и напряжений.....	89
3.4.2. Семейства функций преобразования.....	96
Заключение к разделу 3.....	101
Раздел 4. Принципы построения системы, реализующей кластерные методы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в турбине.....	104

4.1. Обобщенная структурно-функциональная схема системы	104
4.2. Алгоритм предварительной обработки информации о координатах смещений торцов лопаток	106
4.3. Алгоритмы вычисления экстремальных значений кодов 4.3.1. Алгоритм вычисления экстремальных значений кодов на основе аппроксимации выборок кодов ортогональными полиномами Чебышёва I рода	114
4.3.2. Алгоритм вычисления экстремальных значений кодов на основе аппроксимации зоны экстремума квадратичной параболой	123
4.4. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток	124
Заключение к разделу 4	131
Раздел 5. Погрешности системы измерения	133
5.1. Влияние соседних лопаток и уменьшение связанных с ним погрешностей	135
5.1.1. Исследование влияния соседних лопаток на эквивалентные индуктивности чувствительных элементов ...	135
5.1.2. Исследование влияния соседних лопаток на выходные коды измерительной цепи	142
5.2. Влияние температуры и уменьшение связанных с ней погрешностей	147
5.2.1. Исследования влияния температуры на выходные коды измерительной цепи	148
5.2.2. Погрешности измерения температуры чувствительного элемента датчика в канале термодатчика	164
5.3. Погрешности, связанные с изменениями частоты импульсного питания и скорости вращения	172
5.3.1. Оценки погрешностей по экстремальным значениям кодов без использования алгоритмов аппроксимации	174
5.3.2. Оценка погрешностей при использовании алгоритмов аппроксимации кодов	177
5.4. Погрешность алгоритма вычисления координат x, y	179
Заключение к разделу 5	186
Раздел 6. Система измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток	191
6.1. Технические средства	191
6.2. Программное обеспечение системы	193
6.2.1. Программное обеспечение нижнего уровня	193
6.2.2. Программное обеспечение верхнего уровня	194
6.3. Результаты экспериментальных исследований	197
6.3.1. Метрологические показатели	198
6.3.2. Оценка работоспособности	206
Заключение к разделу 6	214
Список литературы	216

Сокращения

АЦП	— аналого-цифровой преобразователь	ОУ	— операционный усилитель
в.г.ц.	— виртуальный геометрический центр кластера	ПО	— программное обеспечение
г.ц.	— геометрический центр	ПП	— первая производная
г.ц.л.	— геометрический центр лопатки	ПР	— преобразователь
ГСП	— горячий спай термопары	ПТН	— преобразователь ток—напряжение
ГТ	— градуировочная таблица	ПЭВМ	— персональная электронно-вычислительная машина
ГТД	— газотурбинный двигатель	РЗ	— радиальный зазор
ГХ	— градуировочная характеристика	РК	— распределенный кластер
ДЧВ	— датчик частоты вращения	СК	— сосредоточенный кластер
ЗУ	— запоминающее устройство	СКО	— среднеквадратичное отклонение
ИЦ	— измерительная цепь	СТ	— согласующий трансформатор
ИЦ-НС	— несимметричная измерительная цепь	СУ	— согласующий усилитель
ИЦ-С	— симметричная измерительная цепь	ТВ	— токовод
КЧЭ	— контур чувствительного элемента	ТП	— термопара
КЭ	— конечный элемент	ФВ	— функция влияния
ЛС	— линия связи	ФП	— функция преобразования
МУс	— масштабирующий усилитель	ЦАП	— цифроаналоговый преобразователь
МФ	— мешающий фактор	ЧЭ	— чувствительный элемент
ОВ	— объемный виток	ЧЭ-Р	— рабочий ЧЭ
ОВТД	— одновитковый вихретоковый датчик	ЧЭ-К	— компенсационный ЧЭ
		ЭДС	— электродвижущая сила
		ЭМВ	— электромагнитное взаимодействие
		ЭТ	— элемент тока

Введение

Известно, что в настоящее время продолжают интенсивные работы по созданию газотурбинных двигателей (ГТД) нового поколения, системы управления которых функционируют на основе текущей измерительной информации о радиальных зазорах (РЗ) между торцами лопаток рабочего колеса и статором в компрессоре и турбине, причём основные преимущества нового поколения ГТД связаны с более высокими показателями надёжности и экономичности. Следует подчеркнуть, что измерения РЗ производятся непосредственно в проточной части компрессора и турбины в ограниченном пространстве, которое, как правило, определяется диаметром установочного отверстия в статорной оболочке, составляющего не более 10 мм и предназначенного для размещения чувствительного элемента (ЧЭ) датчика. Если учесть, что линейная скорость движения торцов лопаток может превышать скорость звука, то время прохождения ЧЭ каждой лопаткой рабочего колеса, а следовательно, время измерения РЗ по каждой лопатке может оказаться очень малым, и будет исчисляться единицами микросекунд. При этом измерение РЗ происходит в условиях повышенной температуры — более 500 °С в компрессоре и свыше 1000 °С в турбине, сопровождается высоким уровнем вибраций, загрязнённостью и интенсивной ионизацией газоздушного тракта.

Все перечисленные условия являются крайне тяжёлыми и даже экстремальными, а потому измерение РЗ в таких условиях можно считать весьма серьёзной и значимой проблемой.

Её решение стало возможным благодаря применению одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с ЧЭ в виде отрезка проводника в составе компьютеризированных систем измерения, работоспособность и эффективность которых была подтверждена в процессе

стендовых испытаний ГТД. Подробные сведения о конструктивных особенностях ОВТД, технических и программных средствах различных вариантов систем измерения РЗ и полученных результатах приведены в монографии [1].

Вместе с тем необходимо отметить важное допущение, принятое в системах измерения при обработке информации, полученной с ОВТД: предполагалось, что изменения РЗ вызывают упругие и температурные деформации рабочего колеса только в одном (радиальном) направлении, а изгибные и угловые деформации пера лопаток, а также осевые смещения колеса 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. При этом информативный параметр ЧЭ ОВТД (его индуктивность) реагирует на изменения всех координатных составляющих, а потому для получения достоверной информации о РЗ с помощью ОВТД необходима информация об остальных составляющих.

Иначе говоря, если поставлена задача получения информации о РЗ (а именно так она формулируется в системах управления двигателями нового поколения), то смещения торцов лопаток в направлении вращения и в осевом направлении, а также их угловые смещения следует рассматривать как мешающие факторы (МФ). Поэтому вполне очевидной оказалась необходимость разработки методов получения информации о координатах смещений торцов лопаток. Отличительной особенностью таких методов является применение кластера (группы) ОВТД с определённой ориентацией и различным размещением ЧЭ относительно торцов лопаток, причём число ОВТД в кластере должно быть равным числу искомым координат смещений. Такие методы получили название кластерных, и их наиболее полное описание, как и описание реализующих эти методы средств измерения, нашло отражение в более поздней монографии [2].

Применительно к системам управления двигателями нового поколения (с использованием текущих значений РЗ) кластерные методы обеспечивают снижение влияния указанных МФ. Вместе с тем применение этих методов в экспериментальных исследованиях лопаточных энергосиловых установок обеспечивает их разработчиков дополнительной и значимой информацией о поведении лопаток не только в рабочих, но и в экстремальных режимах.

В то же время нельзя не отметить, что существующие кластерные методы и средства (включая ОВТД) в основном ориентированы на применение в компрессорах.

Между тем применение ОВТД в турбинах ГТД происходит в условиях более интенсивного воздействия такого МФ, как температура, и не только в газозоудном тракте, где размещён ЧЭ датчика, но и с внешней стороны статорной оболочки, куда с помощью тоководов датчика выносятся его согласующий трансформатор (СТ) [1, 2]. Для уменьшения влияния температурных воздействий на ЧЭ в системах измерения используется термокоррекция, которая предусматривает бесконтактное измерение температуры ЧЭ термопарой (ТП), встроенной в ОВТД [1], горячий спай (ГСп) которой находится на расстоянии нескольких миллиметров от ЧЭ. Но на повышенных температурах возрастает температурный перепад между ЧЭ и ГСп ТП, а с ним и температурная погрешность. Что же касается температуры в зоне размещения СТ датчика вне статорной оболочки (в частности, на её наружной поверхности в турбине), то она может быть выше точки Кюри ферритового магнитопровода, когда характеристики СТ резко ухудшаются.

Поэтому для использования ОВТД в турбинах необходимы дополнительные меры по обеспечению работоспособности СТ, уменьшению влияния температуры (как одного из МФ) и соответствующих погрешностей.

Кроме того, следует отметить, что в существующих и перспективных разработках турбин применяются лопатки, кривизна поверхности которых в её торцевой части может быть значительно выше, чем в компрессорах. Например, сечение плоскостью, перпендикулярной оси одного из возможных конструктивных вариантов турбинной лопатки, имеет резко выраженную серповидную форму, а сечение плоскостью, параллельной её оси, в торцевой части — U-образную. Такая кривизна и форма сечения являются дополнительными МФ, воздействие которых не только затрудняет, но иногда и исключает возможность применения существующих кластерных методов.

Известно также, что непременным условием получения достоверной информации в существующих кластерных методах являются высокоточные данные о так называемой «мгновенной скорости» вращения рабочего колеса (т.е. периода вращения), с помощью

которых после измерения каждого периода вычисляются моменты прохождения замками всех лопаток геометрических центров тех или иных разновидностей кластеров ОВТД. При этом моменты фиксации цифровой информации с датчиков для последующего определения искомым координат смещений должны быть строго синхронизированы с «меткой» на валу рабочего колеса.

Между тем ряд факторов и ограничений препятствует получению требуемой точности. Действительно, выбор технических средств, как правило, ограничен датчиками частоты вращения (ДЧВ) промышленного изготовления, ориентированными на измерение «средней» скорости вращения в температурных условиях, близких к нормальным. Серьёзным МФ для высокоточной синхронизации являются изменения выходного сигнала от скорости вращения вала. Кроме того, существуют трудности в организации механической связи ДЧВ с валом (и тем более в дублировании таких связей при необходимости параллельных измерений скорости вращения и синхронизации на нескольких валах). Действие МФ существенно возрастает при использовании ДЧВ в малогабаритных силовых установках с более плотным расположением лопаток на рабочем колесе и, что не менее важно, с более высокой скоростью вращения.

Поэтому представляется весьма заманчивой идея отказа от использования ДЧВ и измерения «мгновенной» скорости, вычисления моментов прохождения геометрических центров кластера ОВТД замками лопаток и синхронизации при получении информации с датчиков.

Наконец, возвращаясь к турбинным лопаткам с повышенной кривизной поверхности пера и сложной формой в её торцовой части, необходимо обратить внимание на еще один МФ, проявляющийся в воздействии на ЧЭ не только выбранной в непосредственной близости к нему лопатки, но и соседних лопаток, причем их влияние усиливается с уменьшением шага размещения замков лопаток на рабочем колесе и зависит от местоположения кластера ОВТД на статоре, а также от угла разворота ЧЭ по отношению к направлению вращения рабочего колеса.

Исследования влияния этого и других ранее названных МФ, а также разработка новых кластерных методов и реализующих их средств, устраняющих либо уменьшающих влияние всех перечисленных МФ и ориентированных на применение в турбинах ГТД,

выполнялись в Институте проблем управления сложными системами Российской академии наук, начиная с 2010 г., по планам, утверждённым Отделением энергетики машиностроения и процессов управления при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 11-08-01032, 14-08-00802).

Результаты исследований и разработок опубликованы, но материалы отдельных публикаций разбросаны по различным изданиям в журнальных статьях, трудах международных и российских конференций и совещаний, описаниях патентов на изобретения.

На этом фоне представляется вполне назревшей и достаточно очевидной необходимостью в систематизированном и обобщающем изложении как опубликованных материалов, так и новых, полученных за последнее время, которые посвящены кластерным методам и средствам измерения РЗ в турбинах.

Предлагаемая читателям монография призвана решить обозначенную задачу, сохраняя при этом преемственную связь с работами [1, 2], но она коренным образом отличается от этих работ содержанием, включающим шесть разделов.

В первом разделе приводится описание новых разновидностей ОВТД, предназначенных для работы в турбинах, а также кластерных методов измерения РЗ при наличии осевых смещений торцов лопаток.

Во втором разделе рассматриваются модели переходных процессов в ОВТД при импульсном питании, в том числе три модели — передачи напряжения питания через СТ на ЧЭ, электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ с торцевой частью турбинной лопатки с учетом её объема и формы, трансформации информативных изменений эквивалентной индуктивности ЧЭ в первичную обмотку СТ. Приводится описание способов оценки эквивалентных индуктивностей и сопротивления первичных обмоток, а также семейства функций преобразования (ФП) датчиков в составе кластера (зависимостей эквивалентных индуктивностей ЧЭ и первичных обмоток СТ от радиальных и осевых смещений торцов лопаток).

Третий раздел посвящен измерительным цепям (ИЦ) с приближенным дифференцированием и аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) на выходе. Рассматриваются структурные схемы и их функционирование, универсальная модель ИЦ с переменными во времени эквивалентными индуктивностями ЧЭ, полученными с

использованием модели ЭМВ ЧЭ и лопатки, и результаты моделирования, в том числе семейства ФП ИЦ (зависимости цифровых кодов АЦП от радиальных и осевых смещений торцов лопаток).

В четвёртом разделе предлагаются принципы построения систем, реализующих рассматриваемые кластерные методы, — структурно-функциональная схема и алгоритмы предварительной обработки, поиска экстремальных значений кодов и их вычисление при аппроксимации, а также алгоритмы вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток.

Содержание пятого раздела связано с исследованием влияния соседних лопаток, а также с исследованием влияния таких МФ, как температура, скорость вращения рабочего колеса, частота импульсного питания ИЦ. Рассматриваются вызванные ими погрешности системы измерения и методы уменьшения таких погрешностей. Кроме того, исследуются погрешности вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток.

В шестом разделе рассматриваются вопросы практической реализации системы измерения: технические и программные средства действующего макета, результаты метрологических исследований, а также оценка работоспособности системы.

Авторы выражают благодарность А.В. Логвинову, М.П. Андрианову, В.А. Белослудцеву за разработку, изготовление и наладку нестандартных электронных блоков в составе системы измерения, механических устройств и электропривода, предназначенных для экспериментальных исследований системы, за эксплуатационную поддержку оборудования и активное участие в процессе исследования системы.

Авторы благодарны Л.Н. Афанасьевой за помощь в подготовке текста и иллюстраций.

Новые разновидности высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков и кластерных методов измерения радиальных зазоров в турбинах

Как отмечалось во введении, температура (один из действующих МФ) оказывает интенсивное воздействие на ОВТД не только в проточной части турбины, но и вне статорной оболочки, где размещается СТ датчика.

В первой части настоящего раздела рассматриваются новые разновидности высокотемпературных ОВТД, ориентированных на применение в турбинах, в которых приняты конструктивные меры по обеспечению работоспособности СТ при повышенных температурах вне статорной оболочки. Дано краткое изложение известных принципов первичного преобразования в идеализированных ОВТД и ИЦ. Результаты более основательных и развернутых исследований приведены в последующих разделах.

Известно также, что измерение РЗ на некоторых ступенях турбины может сопровождаться смещениями рабочего колеса в осевом направлении, соизмеримыми или существенно превышающими по величине РЗ, причем влияние других возможных составляющих смещений, как правило, незначительно в сравнении с осевыми и ими можно пренебречь. Как отмечалось во введении, наиболее радикальный путь уменьшения влияния осевых смещений (как МФ) — это его измерение наряду со смещением в радиальном направлении (РЗ). Такие измерения возможны, если используются методы, предусматривающие применение двух ОВТД в составе кластера [1, 2].

Во второй части приводится описание новых кластерных методов, которые отличаются от существующих не только уменьшением влияния таких МФ, как повышенная кривизна поверхности и сложная форма в торцевой части турбинной лопатки, но и отказом от предварительных измерений периода вращения рабочего коле-

са, вычисления моментов прохождения лопатками геометрических центров кластера датчиков и синхронизации импульсного питания ИЦ с «меткой» на валу двигателя.

1.1. Высокотемпературные одновитковые вихретоковые датчики для турбины

По внешнему виду новые разновидности ОВТД не имеют каких-либо заметных отличий от существующих [1, 2]. Их работоспособность в проточной части турбины обеспечивается, прежде всего, за счет простейшей конструкции ЧЭ, представляющего собой отрезок проводника с квадратным или прямоугольным сечением, выполненного из тех же сортов нержавеющей стали, что и турбинные лопатки. Безындуктивные (в первом приближении) тоководы (ТВ), выполненные из того же материала, в виде двух коаксиальных цилиндров, проходят через установочное отверстие и соединяют ЧЭ с СТ, расположенным с наружной стороны статорной оболочки. При этом внешний и внутренний ТВ разделяет тонкий слой изоляционного покрытия на внутреннем ТВ (рис. 1.1). Первичная обмотка СТ выполняется проводом с высокотемпературной изоляцией, а его «вторичная обмотка» представляет собой объёмный виток (ОВ), электрически связанный с ТВ и ЧЭ. Основным отличительным признаком первой разновидности СТ в ОВТД, предназначенных для турбины, является использование ферритового магнитопровода с высоким значением точки Кюри (до 450 °С), что обеспечивает работоспособность ОВТД при повышенных температурах вне статорной оболочки турбины, но сопровождается потерей чувствительности из-за сниженной магнитной проницаемости, характерной для та-

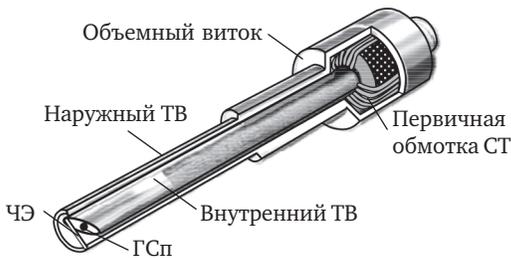


Рис. 1.1. Механическая конфигурация ОВТД

ких ферритов ($\mu = 50 \dots 80$). Компенсация этих потерь связана с увеличением габаритов СТ и датчика.

Дальнейшего повышения допустимой температуры в зоне размещения СТ можно добиться, отказавшись от использования ферритового магнитопровода в СТ (т.е. применяя «воздушный СТ»). При этом каркас под первичную обмотку СТ выполняется из высокотемпературного диэлектрического материала, например керамики, а ОВ — из той же нержавеющей стали (что ЧЭ и ТВ) в виде пустотелого тора с нанесённым на внутреннюю поверхность слоем изоляционного материала, плотно охватывающим катушку первичной обмотки, с прорезью, края которой электрически соединяются с внешним и внутренним ТВ.

В торцевой части внутреннего ТВ поблизости к ЧЭ размещен ГСп ТП, контролирующей изменения температуры ЧЭ и предназначенной для использования в канале термокоррекции системы измерения РЗ (вывод проводов ТП осуществляется через осевое отверстие внутреннего ТВ)¹.

В перспективе планируется разработка и создание ОВТД с элементами конструкций, изготовленными на высокотемпературной керамике с электропроводными и изолирующими покрытиями для ЧЭ и ТВ [3].

Схематическое изображение ОВТД (его электрическая конфигурация) и временные диаграммы токов и эквивалентной индуктивности ЧЭ представлены на рис. 1.2.

Предполагается, что многомерные смещения торцевой части лопатки отсутствуют за исключением радиальных, которые приводят к изменениям РЗ. Принцип последующих преобразований в ОВТД сохраняется без изменений (он изложен в работе [1]) и предусматривает использование импульсного питания прямоугольной формы с амплитудой $U_{\text{п}}$.

Предполагается также, что СТ не искажает передний фронт напряжения питания, которое в контуре ЧЭ возбуждает ток i_2 (i_1 — ток в первичной обмотке СТ). Если лопатка находится на большом расстоянии от ЧЭ ($R_3 \rightarrow \infty$), а влиянием вихревых токов в самом ЧЭ, ОВ и ТВ, связанных с магнитным полем, вызванным током i_2 , можно пренебречь, то ток i_2 в начале переходного процесса определяется

¹ Для повышения точности измерения температуры ЧЭ в ОВТД может быть встроена дополнительная ТП, ГСп которой размещается поблизости от СТ (см. раздел 5).

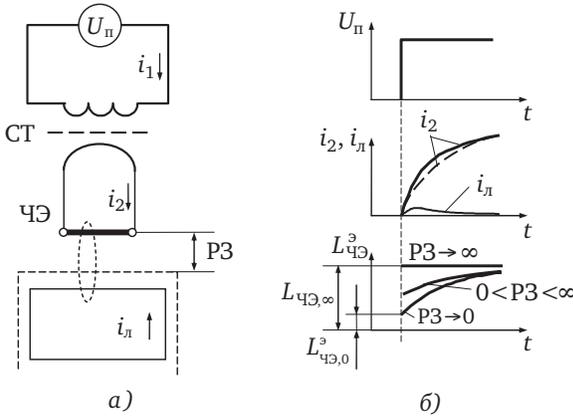


Рис. 1.2. Электрическая конфигурация ОВТД (а) и временные диаграммы токов и эквивалентной индуктивности ЧЭ (б)

в основном индуктивностью ЧЭ, причем изменение i_2 во времени будет иметь нарастающий характер (рис. 1.2, б, штриховая линия). С приближением торца лопатки ($PЗ \rightarrow 0$) под действием магнитного поля (тока i_2), в лопатке появляются вихревые токи, а в имитирующем лопатку контуре — ток $i_{л}$, также изменяющийся во времени. Этот ток ($i_{л}(t)$) влияет на результирующее магнитное поле, что приводит к изменениям формы тока $i_2(t)$ и его отклонениям от прежней зависимости (рис. 1.2, б, сплошная линия). Такие отклонения можно интерпретировать как влияние переменной во времени эквивалентной индуктивности $L_{\text{чэ}}^3(t)$, непостоянство которой в переходном режиме объясняется влиянием вихревых токов $i_{л}$. В работе [1] показано, что в начале переходного процесса при $t \rightarrow 0$ эквивалентная индуктивность ($L_{\text{чэ},0}^3$) минимальна и зависит от $PЗ$. При $t \rightarrow \infty$ вихревые токи затухают ($i_{л} = 0$), индуктивность $L_{\text{чэ}}^3$ возрастает и стремится к $L_{\text{чэ},\infty}^3$ (рис. 1.2, б). Очевидно, что начало переходного процесса характеризуется наибольшей чувствительностью индуктивности к изменениям $PЗ$ и в этой связи момент времени $t = 0$ наиболее привлекателен для последующих преобразований. Поэтому для преобразования изменений эквивалентной индуктивности ЧЭ ($L_{\text{чэ}}^3$) следует использовать так называемый метод первой производной (ПП), который предусматривает фиксацию производной тока i_1 в первичной обмотке СТ в начале переходного процесса при $t \rightarrow 0$, причем предполагается, что эквивалентная индуктивность первичной

обмотки $L_1^3(t) = n_T^2 \cdot L_{\text{ЧЭ}}^3(t)$, где n_T — коэффициент трансформации СТ ($n_T = w_1/w_2$, w_1 и w_2 — число витков, $w_2 = 1$), а её сопротивление — R^3 [1, 4]¹.

Если не учитывать собственную ёмкость первичной обмотки СТ, то переходный процесс в её цепи при импульсном питании $U_{\text{п}}$ с учётом изменяющейся во времени $L_{\text{ЧЭ}}^3(t)$, а следовательно, и $L_1^3(t)$, описывается уравнением:

$$L_1^3(t) \frac{di_1}{dt} + i_1 \left[\frac{dL_1^3(t)}{dt} + R^3 \right] = U_{\text{п}}.$$

Производная тока в момент появления переднего фронта напряжения $U_{\text{п}}$ может быть найдена без решения уравнения, так как $i_1 = 0$ при $t = 0$ и, следовательно,

$$\left. \frac{di_1}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U_{\text{п}}}{L_1^3(0)},$$

где $L_1^3(0)$ — эквивалентная индуктивность при $t = 0$ [$L_1^3(0) = w_1^2 \times \times L_{\text{ЧЭ}}^3(0) = w_1^2 \cdot L_{\text{ЧЭ},0}^3$]. Это означает, что производная тока не зависит от сопротивления R^3 и определяется мгновенным значением индуктивности ($L_{\text{ЧЭ},0}^3$).

Таким образом, метод ПП обеспечивает минимальное время преобразования, максимальную чувствительность к РЗ в момент времени $t = 0$ и повышение точности за счёт исключения влияния изменений R^3 .

1.2. Методы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток

На рис. 1.3 изображена торцевая часть турбинной лопатки (вид со стороны статора) (рис. 1.3, а) и её сечения (А—А и Б—Б) (рис. 1.3, б). Из-за выступов в торцевой части сечения имеют U-образную форму, причём расстояние между выступами зависит от толщины лопатки и уменьшается от головной её части к хвостовой, как и кривизна поверхности пера лопатки. Кроме того, на рис. 1.3 показан условный геометрический центр лопатки (г.ц.л.), находя-

¹ Более подробные исследования переходных процессов в СТ и ЭМВ ЧЭ и лопатки проводятся в разделе 2, а вопросы реализации метода ПП применительно к измерениям не только радиальных, но и осевых смещений рассматриваются в разделе 3.

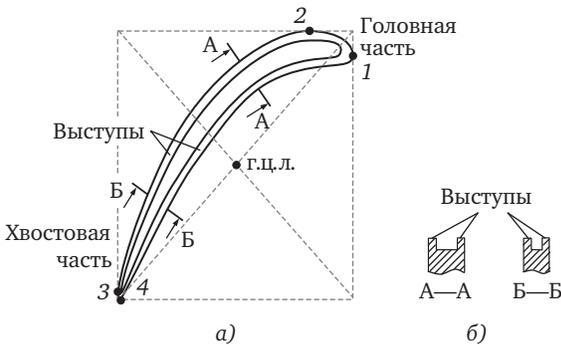


Рис. 1.3. Вид турбинной лопатки со стороны статора, условный г.ц.л. (а) и сечение лопатки (б)

щийся в точке пересечения диагоналей прямоугольника, в который вписывается лопатка, точнее, контурная линия, соответствующая её поверхности, видимая со стороны статора (1—4 — точки касания контурной линии и сторон прямоугольника).

В предлагаемых двух методах измерения радиальных и осевых смещений предусмотрено использование распределенного кластера (РК) из двух ОВТД [2]. Центры ЧЭ ($ЧЭ_1$ и $ЧЭ_2$), как и в существующих методах [2], находятся на угловом расстоянии друг от друга $1,5\Psi_n$, где Ψ_n — угловой шаг установки лопаток.

Методы отличаются размещением ЧЭ ОВТД РК относительно условного г.ц.л., углом разворота ЧЭ относительно направления вращения рабочего колеса, информативными значениями индуктивностей $ЧЭ_1$ и $ЧЭ_2$, фиксируемыми в моменты прохождения ЧЭ торцами лопаток, а также чувствительностью к изменениям РЗ и диапазонами изменений осевых смещений.

1.2.1. Метод измерения с фиксацией минимальных значений эквивалентных индуктивностей чувствительных элементов

Важными отличительными особенностями рассматриваемого метода (*meth 1*) являются размещение ЧЭ РК ОВТД слева от условного г.ц.л., а также разворот ЧЭ ($ЧЭ_1$ и $ЧЭ_2$) на угол $30...60^\circ$ против часовой стрелки относительно направления вращения рабочего колеса (рис. 1.4, а) [5, 6].

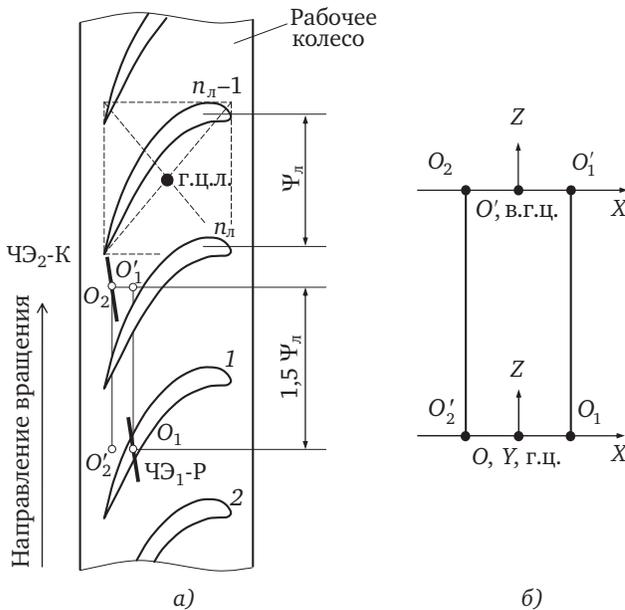


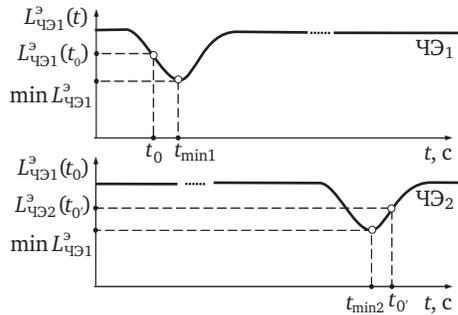
Рис. 1.4. Размещение ЧЭ в РК ОБТД относительно условного г.ц.л. и разворот ЧЭ относительно направления вращения в соответствии с *meth 1* (а), г.ц. и в.г.ц. РК, а также системы отсчета $OXYZ$ и $O'XYZ$ (б)

При таком размещении РК ЭМВ ЧЭ и торца лопатки происходит в её хвостовой части, где кривизна поверхности пера лопатки и её толщина значительно меньше, чем в средней, и тем более в головной части. С уменьшением толщины уменьшается и расстояние между выступами, а следовательно, и их влияние на изменения индуктивности ЧЭ₁ и ЧЭ₂.

Следует отметить, что в соответствии с представленным на рис. 1.4, а положением лопаток $1, 2, \dots, n_l - 1, n_l$ ЧЭ₁ выполняет рабочие функции (ЧЭ₁-Р), а ЧЭ₂ — компенсационные (ЧЭ₂-К). Центр ЧЭ₁ обозначен O_1 , центр ЧЭ₂ — O_2 , и угловое расстояние между ними, как уже отмечалось, составляет $1,5\Psi_l$.

В увеличенном виде размещение центров ЧЭ₁ и ЧЭ₂ показано на рис. 1.4, б. Там же представлены две системы отсчета $OXYZ$ и $O'XYZ$, где начало первой совпадает с геометрическим центром (г.ц.) кластера в точке O , а начало второй — с его виртуальным г.ц. (в.г.ц.) в точке

Рис. 1.5. Изменения эквивалентных индуктивностей во времени



O^1 . При этом точки O и O' , как и точки O_1 и O_2 , смещены на угловое расстояние $1,5\Psi_L$ в направлении оси Z и вращения рабочего колеса.

Необходимо также подчеркнуть, что выбранный угол разворота ЧЭ в совокупности со смещением ЧЭ РК ОБТД влево от условного г.ц.л. обеспечивают тот же характер изменений эквивалентных индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ при прохождении ЧЭ лопатками в процессе вращения рабочего колеса в направлении оси Z и во времени, что и в известных кластерных методах, применяемых в компрессорах (рис. 1.5) [2]. При этом в функциях $L^3_{ЧЭ1}(t)$ и $L^3_{ЧЭ2}(t)$ (или в функциях $L^3_{ЧЭ1}(z)$ и $L^3_{ЧЭ2}(z)$) наблюдается по одному минимальному значению ($\min L^3_{ЧЭ1}$ и $\min L^3_{ЧЭ2}$), которые в рассматриваемом методе предлагается фиксировать как информативный параметр, что является очевидным отличительным признаком *meth 1* от существующих методов, где индуктивности ЧЭ фиксируются в моменты прохождения лопатками г.ц. (t_0) и в.г.ц. (t_0') (на рис. 1.5 — это индуктивности $L^3_{ЧЭ1}(t_0)$ и $L^3_{ЧЭ2}(t_0')$ соответственно)².

Если бы смещения ЧЭ РК ОБТД в сторону хвостовой части не было, а разворот ЧЭ проводился в противоположном направлении (по часовой стрелке) до локальной «квазипараллельности» с контурными линиями поверхностей пера лопатки, то в характере изменений индуктивностей $L^3_{ЧЭ1}$ и $L^3_{ЧЭ2}$ ($L^3_{ЧЭ1}(z)$ и $L^3_{ЧЭ2}(z)$) наблюдался бы эффект «двоения» минимальных значений $\min L^3_{ЧЭ1}$ и $\min L^3_{ЧЭ2}$,

¹ Термины «г.ц.» и «в.г.ц.» имеют свою историю [2]. Термин «г.ц.» связан с появлением сосредоточенных кластеров (СК). Например в СК из двух ОБТД (с центрами ЧЭ₁ и ЧЭ₂ в точках O_1 и O_2) г.ц. совпадает с точкой O (рис. 1.4, б). Термин («в.г.ц.») связан с появлением РК. В РК из двух ОБТД центр ЧЭ₂ смещен в точку O_2 , а в.г.ц. — это результат смещения г.ц. СК в точку O' (или проекция точки O на ось X системы отсчета $O'XYZ$).

² Идея фиксации минимальных значений индуктивностей была предложена в работе [2], но дальнейшего развития не получила.

связанный со специфической формой сечений А—А и Б—Б (выступами в торцевой части лопатки).

Таким образом, выбранные направления смещения РК и разворота ЧЭ позволяют уменьшить влияние кривизны поверхности и формы сечения лопатки, а использование минимальных значений индуктивностей ЧЭ — избавиться от дополнительных МФ — необходимости измерения периода вращения рабочего колеса и синхронизации, предусматриваемых в известных кластерных методах [2]. Величина смещения и угол разворота ЧЭ уточняются с помощью моделирования или экспериментально и зависят от конструктивных разновидностей лопаток.

Известно, что семейство ФП ЧЭ в составе РК из двух ОВТД представляются в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ от координат смещений торцов лопаток x и y ($L_{\text{ЧЭ1}}^3(x,y)$, $L_{\text{ЧЭ2}}^3(x,y)$) [2]. В системах измерения, реализующих существующие кластерные методы, для вычисления координат x , y используются градуировочные характеристики (ГХ), полученные экспериментально и представляющие зависимости цифровых кодов $C_1(x,y)$ и $C_2(x,y)$, соответствующие ($L_{\text{ЧЭ1}}^3(x,y)$, $L_{\text{ЧЭ2}}^3(x,y)$). На основе ГХ и текущих значений кодов (C_1 и C_2) составляется и решается система двух уравнений с двумя неизвестными (x, y):

$$\begin{cases} C_1 = C_1(x, y); \\ C_2 = C_2(x, y). \end{cases} \quad (1.1)$$

Решению системы уравнений (1.1) предшествует предварительная аппроксимация ГХ полиномиальными функциями двух переменных или кусочно-линейная (кусочно-полиномиальная) интерполяция. Если соблюдается условие монотонности ГХ в заданном диапазоне изменений искомых координат, то их вычисления проводятся с помощью алгоритма на основе метода Ньютона [2, 7].

Аналогичный подход применяется и в системах измерения, реализующих *meth 1*. Однако, в отличие от существующих, *meth 1* предусматривает фиксацию кодов C_1 и C_2 при получении семейства ГХ, а также текущих значений кодов C_1 и C_2 , соответствующих минимальным значениям индуктивностей ЧЭ — $\min L_{\text{ЧЭ1}}^3$ и $\min L_{\text{ЧЭ2}}^3$ (рис. 1.5)¹.

¹ В разделе 3 показано, что в ИЦ, которая включает ОВТД₁ и ОВТД₂ РК, минимальным значениям индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ соответствуют экстремальные значения кодов.

1.2.2. Метод измерения с повышенной чувствительностью к радиальным смещениям в расширенном диапазоне осевых смещений торцов лопаток

Стремление уменьшить влияние кривизны поверхности пера лопаток и выступов в её торцевой части путём смещения ЧЭ РК ОВТД влево от условного г.ц.л., а также выбранный угол разворота ЧЭ (до 60° против часовой стрелки), т.е. практически «квазиперпендикулярно» контурной линии поверхностей пера лопатки, приводят к существенному уменьшению полезных изменений эквивалентных индуктивностей ЧЭ и, как следствие, падению чувствительности к искомым РЗ (координате y).

Поэтому рассматриваемый здесь метод (*meth 2*) призван, в первую очередь, обеспечить более высокую чувствительность к изменениям РЗ. Для решения этой задачи представляется необходимым исходное размещение ЧЭ РК ОВТД вблизи условного г.ц.л. и даже дополнительное смещение вправо от условного г.ц.л. (в сторону головной части лопатки). При этом ЧЭ должны быть развернуты по часовой стрелке до локальной «квазипараллельности» контурным линиям поверхностей пера лопатки (рис. 1.6) [8—10].

Но, как отмечалось в разделе 1.2.1, такое размещение РК и разворот ЧЭ вызывают эффект «двоения» минимальных значений эквивалентных индуктивностей ЧЭ, которые рассматривались как проявление влияния МФ. В этой связи в отличие от *meth 1* в *meth 2* эффект «двоения» не устраняется, а, напротив, предлагается его полезное использование в предположении, что *meth 2* ориентирован на измерение РЗ (координаты y) в расширенном диапазоне изменений осевых смещений (координата x) по сравнению с *meth 1*¹.

Рисунок 1.7 иллюстрирует влияние больших осевых смещений (x) на характер изменений эквивалентных индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ во времени ($L_{ЧЭ1}^3(t)$ и $L_{ЧЭ2}^3(t)$). В исходном положении РК ОВТД относительно условного г.ц.л. путем юстировки угла разворота обоих ЧЭ добиваются хотя бы приближенного равенства минимальных значений индуктивностей $\min_1 L_{ЧЭ1}^3$ и $\min_2 L_{ЧЭ1}^3$, $\min_1 L_{ЧЭ2}^3$ и $\min_2 L_{ЧЭ2}^3$ в моменты времени $t_{\min1(1)}$ и $t_{\min2(1)}$, $t_{\min1(2)}$ и $t_{\min2(2)}$ соответственно (рис. 1.7, а).

¹ Ограниченный диапазон изменений координаты x связан и с требованием монотонности ГХ.

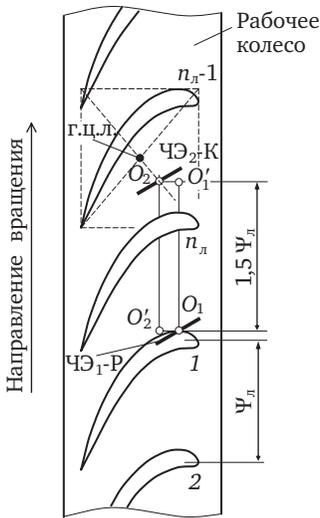
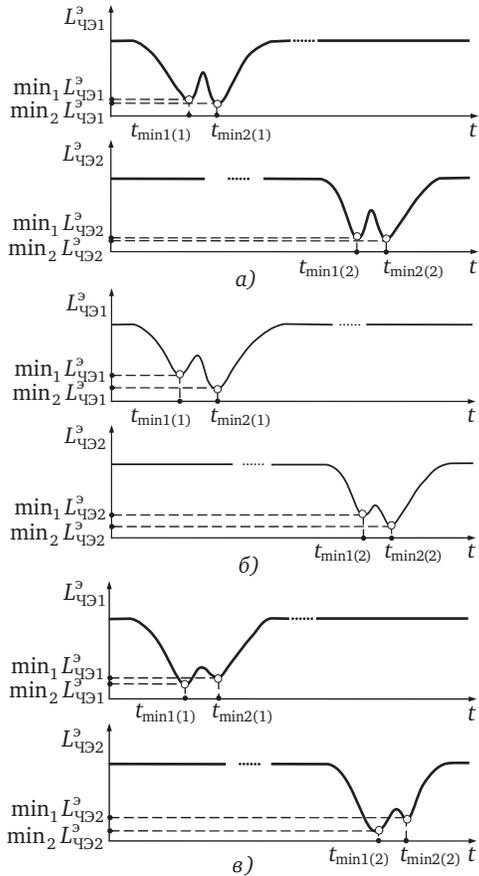


Рис. 1.6. Размещение ЧЭ РК ОВТД относительно условного г.ц.л. и разворот ЧЭ относительно направления вращения рабочего колеса в соответствии с *meth 2*

Рис. 1.7. Изменения эквивалентных индуктивностей во времени: в исходном положении РК относительно условного г.ц.л. (а), при смещении лопатки вдоль оси X в отрицательном (б) и в положительном (в) направлениях



Вместе с тем результаты исследований влияния смещений лопатки вдоль оси X в сторону отрицательных значений координаты x показали увеличение первого из двух минимальных значений индуктивностей, как ЧЭ₁, так и ЧЭ₂ ($\min_1 L_{ЧЭ1}^3, \min_1 L_{ЧЭ2}^3$) по сравнению со вторым ($\min_2 L_{ЧЭ1}^3, \min_2 L_{ЧЭ2}^3$) (рис. 1.7, б). Более того, при дальнейшем смещении лопатки в том же направлении процесс увеличения $\min_1 L_{ЧЭ1}^3, \min_1 L_{ЧЭ2}^3$ замедляется, эффект «двоения» постепенно исчезает, и характер изменений

индуктивностей обоих ЧЭ становится идентичным эяграм $L_{\text{ЧЭ1}}^3(t)$ и $L_{\text{ЧЭ2}}^3(t)$, приведенным на рис. 1.5¹.

При этом ЭМВ ЧЭ и лопатки происходит в ее головной части, а характер изменений индуктивностей $L_{\text{ЧЭ1}}^3(t)$ и $L_{\text{ЧЭ2}}^3(t)$ определяет суммарное действие таких параметров, как «угол встречи» ЧЭ с линией контуров поверхностей пера лопатки и ее кривизна, ширина выступов и их высота и др., среди которых трудно выделить параметр с доминирующим влиянием.

Результаты исследования влияния смещения лопатки в противоположном направлении (в сторону положительных значений координаты x) выявили увеличение не первого, а второго из двух минимальных значений как ЧЭ₁, так и ЧЭ₂ (рис. 1.7, в) с последующим исчезновением эффекта «двоения». При этом ЭМВ ЧЭ происходит с той частью лопатки, которая приближается к хвостовой.

Таким образом, при смещениях в расширенном диапазоне изменений координаты x от отрицательных значений до положительных происходит «конкуренция» минимальных значений индуктивностей и смена «лидера» в окрестностях координаты $x = 0$. В этой связи в рассматриваемом методе (*meth 2*) информативным параметром принято считать наименьшее из двух минимальных значений индуктивности. Если же оба минимума окажутся равными, то они имеют и равные права на признание информативными, а потому не имеет значения, какой из них будет выбран².

В заключение необходимо отметить, что при реализации *meth 2* (как и *meth 1*) в системах измерения для вычисления искомых координат x и y на основе семейства ГХ ($C_1(x,y)$ и $C_2(x,y)$) и текущих значений кодов (C_1, C_2) составляется и решается система уравнений (1.1). Однако в отличие от *meth 1* предлагаемый *meth 2* предусматривает фиксацию кодов (C_1, C_2) при получении семейства ГХ и те-

¹ Исследования проводились на моделях ЭМВ ЧЭ и лопатки, а также экспериментально на действующих макетах ОВТД, причем кривизна контурных линий поверхностей пера лопатки, ее толщина и форма сечения, равно как и соотношение основных размеров лопатки и ЧЭ на рис. 1.1, соответствовали натурным образцам и принятым в моделях (см. раздел 2).

² Частный случай равенства минимумов (или близкого к нему состояния приближенного равенства) является штатным, когда диапазон осевых смещений невелик и его границы находятся вблизи начала системы отсчета в исходном положении РК ОВТД (рис. 1.7, а). Поскольку минимальные значения индуктивностей могут оказаться трудно различимыми, информативным признаком в этом случае можно считать либо первый во времени, либо второй минимум.

кущих кодов (C_1, C_2), соответствующих наименьшим значениям индуктивностей ЧЭ₁ из двух минимумов — индуктивностей $\min_1 L_{ЧЭ1}^3$, $\min_2 L_{ЧЭ1}^3$ и ЧЭ₂ — $\min_1 L_{ЧЭ2}^3$, $\min_2 L_{ЧЭ2}^3$ (рис. 1.7).

Следует также подчеркнуть, что в широком диапазоне изменений координаты x возможна потеря монотонности ГХ ($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$) и аппроксимирующих их функций. При этом система уравнений (1.1) становится неразрешимой для алгоритмов на основе метода Ньютона [7]. В работах [11, 12], а также в разделе 4.4 приведены описания алгоритма, обеспечивающего решение системы уравнений, в котором снимаются требования монотонности функций $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$. Разумеется, этот алгоритм не ограничивается реализациями *meth 2*, а может быть использован в реализациях *meth 1* для расширения диапазонов изменений координаты x .

Заключение к разделу 1

Предложены новые разновидности высокотемпературных ОВТД, ориентированные на применение в турбинах, в которых приняты конструктивные меры по обеспечению работоспособности СТ при повышенных температурах на внешней поверхности статорной оболочки, а также используются соответствующие материалы. В первой разновидности первичная обмотка СТ выполняется из провода с высокотемпературной изоляцией и ферритовый сердечник выбирается с наибольшей точкой Кюри (до 450 °С). Вторая разновидность ОВТД обеспечивает дальнейшее повышение температуры в зоне размещения СТ. В такой конструкции ферритовый сердечник отсутствует, т.е. используется «воздушный СТ», но его габариты возрастают.

Разработаны новые кластерные методы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, применяемых в турбинах ГТД. Как и в существующих кластерных методах, во вновь разработанных используется РК из двух ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника.

Отличительные особенности первого из разработанных методов — смещение РК в сторону хвостовой части каждой из лопаток рабочего колеса от условного г.ц.л., а также разворот обоих ЧЭ на угол 30...60° относительно направления вращения против часовой стрелки, что обеспечивает устранение эффекта «двоения» минималь-

ных значений в изменениях эквивалентных индуктивностей ЧЭ при прохождении лопаток в зонах их чувствительности, связанного с влиянием выступов в торцевой части каждой лопатки. Кроме того, такое размещение и разворот обеспечивают выбор информативных параметров — по одному минимуму индуктивности в зависимостях от времени каждого ЧЭ в РК ОВТД.

В отличие от первого метода, во вновь разработанном втором предусмотрены смещение г.ц. РК в сторону головной части лопаток и разворот ЧЭ на угол 60° от направления вращения рабочего колеса по часовой стрелке, что обеспечивает повышение чувствительности к искомым радиальным смещениям по сравнению с первым методом. При этом эффект «двоения» минимальных значений индуктивностей ЧЭ в их зависимостях от времени при вращении рабочего колеса не устраняется, но во втором методе в качестве информативного параметра выбрано наименьшее из двух минимальных значений эквивалентных индуктивностей ЧЭ.

Модели переходных процессов в одновитковом вихретоковом датчике при импульсном питании

Рассматриваются три модели: передачи импульсного напряжения питания через СТ ОВТД на ЧЭ, ЭМВ ЧЭ с торцевой частью турбинной лопатки, трансформации эквивалентной индуктивности ЧЭ в первичную обмотку СТ.

Первая модель обеспечивает получение в аналитическом виде выражений токов в первичной обмотке СТ и ОВ, а также напряжения на ЧЭ, изменяющихся во времени в ответ на ступенчатое возмущение напряжения питания на первичной обмотке. При этом полученное выражение напряжения на ЧЭ позволяет дать оценку его возможным отклонениям от идеальной ступени в начальной области переходного процесса для обеих разновидностей высокотемпературных ОВТД, в которых СТ выполнен на ферритовом сердечнике или используется «воздушный СТ» (раздел 1) [13].

Вторая модель является численной, построенной на основе метода конечных элементов (КЭ) и отличается от известных моделей учетом объема и формы торцевой части реально существующих турбинных лопаток (их сечения представлены на рис. 1.3). Модель позволяет получить расчетным путём значения эквивалентной индуктивности ЧЭ как функции времени для заданных радиальных и осевых смещений торца лопатки (координат y и x соответственно), а также семейства ФП в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей обоих ЧЭ РК ОВТД (при фиксированном времени) от координат смещений (для методов измерения, рассмотренных в разделе 1) [14].

И, наконец, третья модель обеспечивает получение в аналитическом виде выражения, связывающего значения эквивалентной индуктивности ЧЭ (найденные с помощью второй модели) с индуктивностью первичной обмотки СТ [4].

Кроме того, приводятся результаты вычислительных экспериментов и экспериментальных исследований, которые включают, в частности, зависимости напряжений на ЧЭ и эквивалентной индуктивности ЧЭ от времени, а также семейства ФП — не только зависимости эквивалентных индуктивностей ЧЭ, но и индуктивности первичных обмоток СТ (трансформированных эквивалентных индуктивностей ЧЭ) от координат x, y .

2.1. Модель передачи импульсного напряжения питания через согласующий трансформатор на чувствительный элемент датчика

На рис. 2.1 изображена эквивалентная схема, которая в идеализированном виде представляет входную часть одной из двух ветвей дифференциальной ИЦ.

Помимо ОВТД схема содержит источник питания постоянного напряжения E , ключ K , формирующий ступенчатое напряжение. Благодаря применению дополнительных преобразований (их подробное описание приводится в разделе 3), ИЦ обеспечивает приближенное дифференцирование тока i ($\Delta i/\Delta t$) в начале переходного процесса и реализацию метода ПП.

ОВТД, в свою очередь, представлен СТ с индуктивностью первичной обмотки L_1 и ОВ — L_2 , безындуктивными ТВ (индуктивность ТВ должна быть минимальна — $L_{ТВ} \rightarrow 0$), а также ЧЭ с индуктивностью $L_{ЧЭ}$ ¹. Кроме того, в эквивалентную схему включены резисторы с омическими сопротивлениями источника питания (r), ключа в замкнутом состоянии (R_K) и первичной обмотки СТ ($R_{СТ}$) (их суммарное сопротивление $R_1 = r + R_K + R_{СТ}$), а также сопротивлениями ЧЭ ($R_{ЧЭ}$), ТВ ($R_{ТВ}$) и ОВ ($R_{ОВ}$) (суммарное сопротивление $R_2 = R_{ЧЭ} + R_{ТВ} + R_{ОВ}$).

При замыкании ключа в контурах первичной обмотки, ОВ и ЧЭ начинается переходный процесс, который описывает система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} + i_1 R_1 = E; \\ L_{ЧЭ} \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2 = \frac{d\psi_2}{dt}, \end{cases} \quad (2.1)$$

¹ Индуктивности L_1 и L_2 зависят от числа витков и магнитного сопротивления магнитопровода (см. раздел 2.3), индуктивность ЧЭ определяется геометрическими, электрическими и магнитными характеристиками отрезка проводника (см. раздел 2.2).

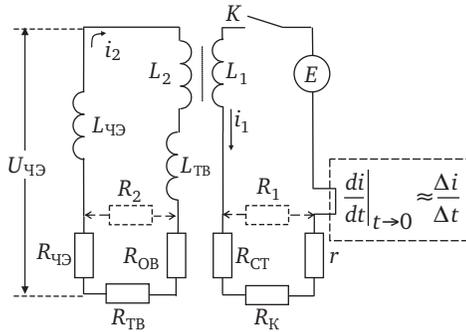


Рис. 2.1. Эквивалентная схема одной из ветвей дифференциальной ИЦ

где ψ_1, ψ_2 — потокосцепления с первичной обмоткой и ОБ СТ; i_1, i_2 — токи в соответствующих контурах. При этом потокосцепления можно представить выражениями

$$\begin{aligned} \psi_1 &= L_1 i_1 - M i_2; \\ \psi_2 &= M i_1 - L_2 i_2, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где M — взаимдуктивность контуров первичной обмотки и ОБ СТ. С учетом (2.2) система уравнений (2.1) примет вид:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} + i_1 R_1 = E; \\ L_{чЭ} \frac{di_2}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + i_2 R_2 = 0 \end{cases}$$

или в операторной форме:

$$\begin{cases} L_1 p i_1(p) - M p i_2(p) + R_1 i_1(p) = E; \\ L_{чЭ} p i_2(p) + L_2 p i_2(p) - M p i_1(p) + R_2 i_2(p) = 0. \end{cases} \quad (2.3)$$

Токи в контурах, найденные из системы уравнений (2.3), имеют вид:

$$\begin{aligned} i_1(p) &= \frac{ER_2}{L_1 L_2 + L_1 L_{чЭ} - M^2} \cdot \frac{1}{p^2 + ap + d} + \\ &+ \frac{E(L_2 + L_{чЭ})}{L_1 L_2 + L_1 L_{чЭ} - M^2} \cdot \frac{p}{p^2 + ap + d}; \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$i_2(p) = \frac{EM}{L_1 L_2 + L_1 L_{\text{чЭ}} - M^2} \cdot \frac{p}{p^2 + ap + d}, \quad (2.5)$$

$$\text{где } a = \frac{R_1(L_2 + L_{\text{чЭ}}) + R_2 L_1}{L_1 L_2 + L_1 L_{\text{чЭ}} - M^2}; \quad d = \frac{R_1 R_2}{L_1 L_2 + L_1 L_{\text{чЭ}} - M^2},$$

напряжение на ЧЭ:

$$U_{\text{чЭ}}(p) = L_{\text{чЭ}} p i_2(p) + R_{\text{чЭ}} i_2(p), \quad (2.6)$$

где $i_2(p)$ определяется выражением (2.5), и после их подстановки в (2.6):

$$\begin{aligned} U_{\text{чЭ}}(p) = & E \frac{L_{\text{чЭ}} M}{L_1 L_2 + L_{\text{чЭ}} L_1 - M^2} \cdot \frac{p^2}{p^2 + ap + d} + \\ & + E \frac{R_{\text{чЭ}} M}{L_1 L_2 + L_{\text{чЭ}} L_1 - M^2} \cdot \frac{p}{p^2 + ap + d}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Тогда оригиналы токов в контурах и напряжения на ЧЭ будут иметь вид:

$$\begin{aligned} i_1(t) = & \frac{ER_2}{L_1 L_2 + L_1 L_{\text{чЭ}} - M^2} \cdot \frac{1}{d} \left[1 - \frac{1}{2b} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}) \right] + \\ & + \frac{E(L_2 + L_{\text{чЭ}})}{L_1 L_2 + L_1 L_{\text{чЭ}} - M^2} \cdot \frac{1}{2b} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}); \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$i_2(t) = \frac{EM}{L_1 L_2 + L_1 L_{\text{чЭ}} - M^2} \cdot \frac{1}{2b} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}); \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} U_{\text{чЭ}}(t) = & E \frac{ML_{\text{чЭ}}}{L_1 L_2 + L_1 L_{\text{чЭ}} - M^2} \cdot e^{-at/2} \left(\text{ch}(bt) - \frac{a}{2b} \text{sh}(bt) \right) + \\ & + E \frac{MR_{\text{чЭ}}}{L_1 L_2 + L_1 L_{\text{чЭ}} - M^2} \cdot \frac{1}{b} e^{-at/2} \text{sh}(bt), \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \text{где } p_{1,2} = & -\frac{1}{2}a \pm \sqrt{\frac{1}{4}a^2 - d}; \quad b = \sqrt{\frac{1}{4}a^2 - d}; \quad \text{ch}(bt) = \frac{e^{bt} + e^{-bt}}{2}; \quad \text{sh}(bt) = \\ = & \frac{e^{bt} - e^{-bt}}{2}. \end{aligned}$$

Известно, что коэффициент связи между контурами $k_{св} = M/\sqrt{L_1 L_2}$, причем в СТ ОБТД, выполненных на ферритовых или керамических кольцах [3], $k_{св}$ можно считать равным единице ($k_{св} = 1$). Тогда выражения (2.8)—(2.10) примут вид:

$$i_1(t) = \frac{ER_2}{L_1 L_{чЭ}} \cdot \frac{1}{d} \left[1 - \frac{1}{2b} (p_1 e^{p_2 t} - p_2 e^{p_1 t}) \right] + \frac{E(L_2 + L_{чЭ})}{L_1 L_{чЭ}} \cdot \frac{1}{2b} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}); \quad (2.11)$$

$$i_2(t) = \frac{E\sqrt{L_1 L_2}}{L_1 L_{чЭ}} \cdot \frac{1}{2b} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}); \quad (2.12)$$

$$U_{чЭ}(t) = L_{чЭ} \frac{di_2(t)}{dt} + R_{чЭ} i_2(t) = \frac{E\sqrt{L_1 L_2} L_{чЭ}}{L_1} \cdot e^{-at/2} \times \left(\operatorname{ch}(bt) - \frac{a}{2b} \operatorname{sh}(bt) \right) + \frac{ER_{чЭ}\sqrt{L_1 L_2}}{L_1 L_{чЭ}} \cdot \frac{1}{b} e^{-at/2} \operatorname{sh}(bt); \quad (2.13)$$

$$a = \frac{1}{L_1 L_{чЭ}} [R_1 (L_2 + L_{чЭ}) + R_2 L_1]; \quad d = \frac{R_1 R_2}{L_1 L_{чЭ}}.$$

Из анализа выражений (2.11) и (2.12) следует, что ток $i_1(t)$ монотонно возрастает от нуля до установившегося значения (при $t \rightarrow \infty$), ток $i_2(t)$ при этом сначала возрастает до максимума, а затем возвращается к нулевому значению.

Напряжение на ЧЭ $U_{чЭ}(t)$ согласно выражениям (2.6) и (2.13) содержит два слагаемых. Первое — это падение напряжения на индуктивности $L_{чЭ}$ ($U_L(t)$), характер изменения во времени которого определяется производной $di_2(t)/dt$: в момент замыкания ключа ($t = 0$), как и напряжение питания первичной обмотки, U_2 возрастет скачком и сохраняет далее положительную полярность до момента t_m (максимума $i_2(t)$). Изменение во времени второго слагаемого $U_R(t)$ определяется только формой тока $i_2(t)$. На начальном участке переходного процесса суммарное напряжение $U_{чЭ}$ в момент $t = 0$ определяется только первым слагаемым (второе — равно нулю), а дальнейшее изменение $U_{чЭ}$ во времени зависит от соотношения па-

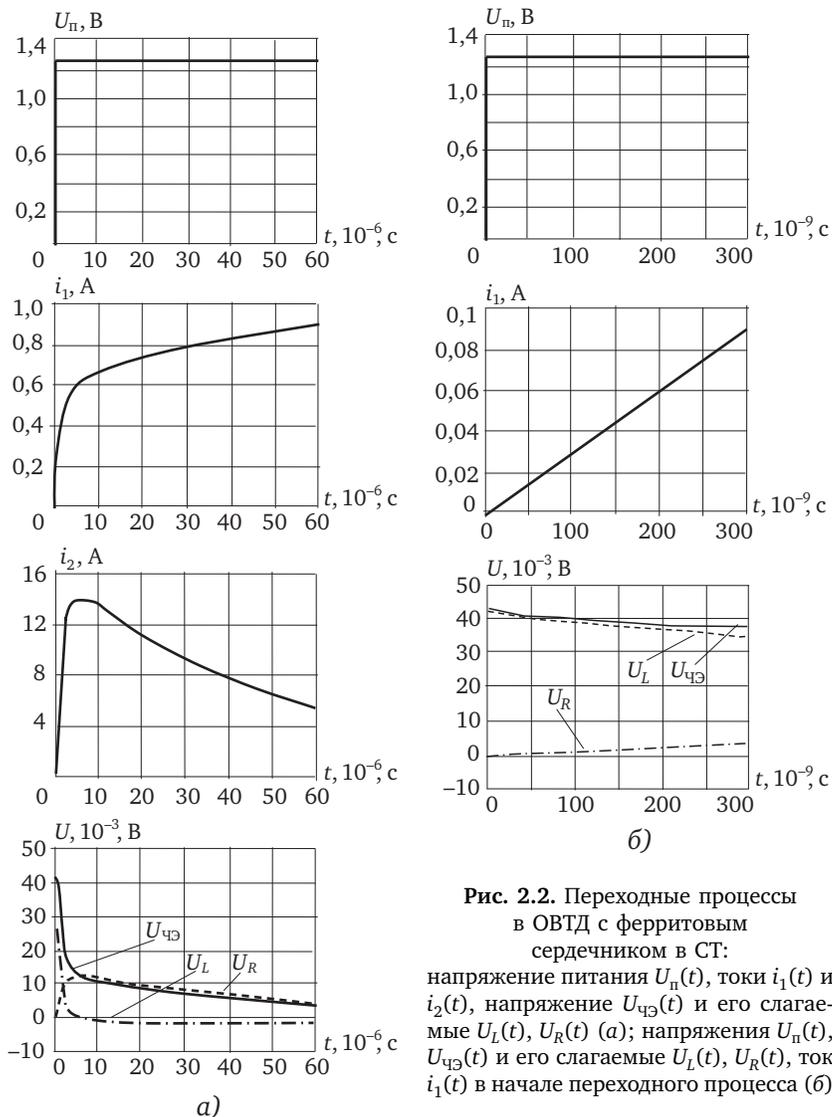


Рис. 2.2. Переходные процессы в ОВД с ферритовым сердечником в СТ: напряжение питания $U_{\text{п}}(t)$, токи $i_1(t)$ и $i_2(t)$, напряжение $U_{\text{чз}}(t)$ и его слагаемые $U_L(t)$, $U_R(t)$ (а); напряжения $U_{\text{п}}(t)$, $U_{\text{чз}}(t)$ и его слагаемые $U_L(t)$, $U_R(t)$, ток $i_1(t)$ в начале переходного процесса (б)

раметров схемы — может возрастать, уменьшаться и даже оставаться неизменным, повторяя ступенчатую форму напряжения питания первичной обмотки СТ.

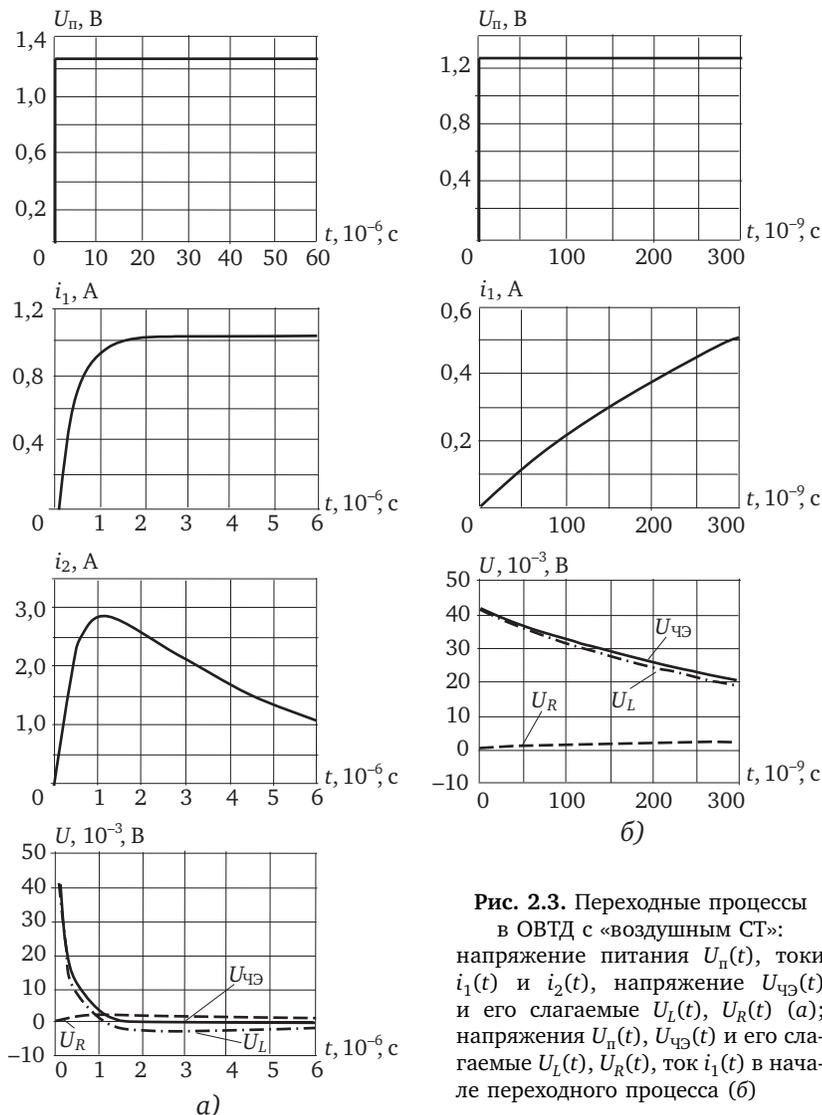


Рис. 2.3. Переходные процессы в ОВТД с «воздушным СТ»: напряжение питания $U_n(t)$, токи $i_1(t)$ и $i_2(t)$, напряжение $U_{чз}(t)$ и его слагаемые $U_L(t)$, $U_R(t)$ (а); напряжения $U_n(t)$, $U_{чз}(t)$ и его слагаемые $U_L(t)$, $U_R(t)$, ток $i_1(t)$ в начале переходного процесса (б)

На рис. 2.2, а представлены результаты расчета переходных процессов, возбуждаемых ступенчатым напряжением $U_n(t)$ (при $E = 1,25$ В). ОВТД изготовлен из жаропрочной нержавеющей стали

и предназначен для применения в турбине, причем магнитопровод СТ датчика выполнен из высокотемпературного феррита¹.

При этом на рис. 2.2, *а* изображен практически весь переходный процесс, а на рис. 2.2, *б* — только его начальный участок (до $0,3 \cdot 10^{-6}$ с).

Результаты расчета токов $i_1(t)$, $i_2(t)$ и напряжения $U_{чэ}(t)$ (включая его слагаемые) в целом подтверждают анализ выражений (2.11)—(2.13), приведенный выше. Вместе с тем, необходимо подчеркнуть, что передача ступенчатого напряжения питания $U_{п}(t) \approx E$ через СТ в самом начале переходного процесса происходит почти без искажений в полном соответствии с коэффициентом трансформации — $U_{чэ} \approx E/w_1$.

Далее приводятся результаты расчета тех же токов и напряжения в ОВТД с «воздушным СТ» (рис. 2.3). Предполагается, что ОВТД изготовлен из тех же материалов с теми же геометрическими и электрическими параметрами. Это относится и к СТ, но его сердечник выполнен из керамики, магнитная проницаемость которой $\mu = 1$.

При этом в исходных данных для расчета в ОВТД с «воздушным СТ» изменяются только индуктивности первичной обмотки (L_1) и ОВ (L_2) — они уменьшаются более чем на порядок (омические сопротивления R_1 и R_2 в эквивалентной схеме (см. рис. 2.1) сохраняют свои значения).

Снижение индуктивностей приводит к существенному уменьшению длительности переходных процессов (рис. 2.3, *а*), хотя характер изменений рассматриваемых токов и напряжений в целом сохраняется, если не считать более чем пятидесятипроцентного отклонения напряжения $U_{чэ}(t)$ от идеальной ступени на интервале времени до 0,3 мкс.

Чтобы уменьшить эти отклонения, необходимо увеличить индуктивности (L_1 , L_2), но в «воздушном СТ» это возможно только при увеличении габаритов СТ.

¹ Длина ЧЭ ОВТД — 8 мм; сечение ЧЭ 1×1 мм; длина токовода — 65 мм; наружный диаметр ОВТД в области СТ — 25 мм; высота корпуса СТ — 10 мм; материал ЧЭ — нержавеющая сталь марки ВЖ-98; ферритовое кольцо марки ВТ-50; число витков первичной обмотки СТ — 30; диаметр провода первичной обмотки СТ — 0,15 мм. Рассчитанные параметры по указанным исходным данным составляют: $R_1 = 1,2$ Ом; $R_2 = 0,001$ Ом; $L_1 = 3,0 \cdot 10^{-5}$ Гн; $L_2 = 3,3 \cdot 10^{-8}$ Гн.

2.2. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента и лопатки с учетом её объема и формы

В настоящее время известны две группы моделей ЭМВ ЧЭ ОВТД в составе кластера и лопатки: упрощенные (они названы аналитическими [7]) и более сложные — численные [15—17].

В моделях первой группы обеспечивается представление результатов в виде упрощенных формул, не содержащих численных итераций, что снижает трудоемкость вычислений и позволяет наиболее эффективно использовать такие модели на ранних стадиях проектирования систем.

Получению математического описания моделей предшествует геометрическое и электрическое представление ЭМВ. При этом ЧЭ и лопатка заменяются электропроводными контурами с допущениями, что параметры магнитного поля в пределах каждого контура не зависят от координат, а проводники, образующие контур, имеют ничтожно малый диаметр [2].

По закону Био—Савара [18] определяются величина индукции магнитного поля, которое создает каждая из сторон контуров в окружающем пространстве, и магнитные потоки, связанные с контурами. Далее находятся соответствующие ЭДС, и на основе второго закона Кирхгофа [19] для всех контуров как электрических цепей с сосредоточенными параметрами составляется система уравнений, позволяющая найти токи в ветвях и семейство ФП в виде формул, связывающих индуктивности¹ ЧЭ с координатами смещений, а также параметрами ЧЭ и лопатки. Там же [2] показана возможность повышения адекватности моделей первой группы путем увеличения числа контуров в лопатке с последующим интегрированием создаваемых ими индукций.

Вместе с тем необходимо отметить, что все без исключения кластерные методы измерения координат смещений торцов лопаток (в том числе и методы измерения x , y -координат смещений торца турбинной лопатки, описание которых приведено в разделе 1) предусматривают применение ИЦ с импульсным питанием, в которых фиксация выходного сигнала происходит с задержкой во времени от

¹ Индуктивности вычисляются по найденным магнитным потокам (потокосцеплениям) и токам.

переднего фронта прямоугольного импульса напряжения питания, зависящей от используемых разновидностей ИЦ (раздел 3).

Однако работоспособность аналитических моделей обеспечивается только с допущением, предполагающим фиксацию изменений индуктивности ЧЭ, связанных с координатами смещений, в момент подачи импульса питания ИЦ, т.е. в момент $t = 0$, что является очевидной идеализацией и может оказаться серьезным ограничением к применению моделей первой группы.

От указанного ограничения свободны известные модели второй группы (численные модели), которые обеспечивают получение искомого изменения индуктивностей ЧЭ не только от изменений координат смещений, но и от времени. Модели второй группы отличаются применением метода КЭ, хотя в подходе к их построению просматриваются очевидные аналогии: геометрическое и электрическое представление с использованием закона Био—Савара, эквивалентные схемы и законы Кирхгофа для составления системы дифференциальных уравнений. Описания такого подхода к построению моделей ЭМВ одного ЧЭ с торцом лопатки, а также нескольких ЧЭ ОВТД в составе кластера между собой и с торцом лопатки приведены в работах [15—17]. Разбиение на КЭ производится с равномерным шагом по длине, ширине и высоте. При этом формируется геометрическое представление модели — объёмная сетка из бесконечно тонких проводящих нитей, проходящих по рёбрам КЭ. В этом случае электрически представленный КЭ сохраняет пространственное положение и геометрию исходного КЭ, а потому и все объекты ЭМВ, которые складываются из электрических эквивалентов соответствующих КЭ, в своих электрических представлениях будут адекватны исходным геометрическим представлениям.

Каждый проводник КЭ рассматривается в [15] как элемент тока (ЭТ). Соединение проводников в точке образует узел, а замкнутое соединение — контур. В контурах объёмной сетки под воздействием магнитного поля, возбуждаемого током ЧЭ, возникают ЭДС и соответствующие контурные (вихревые) токи. Каждый ЭТ в окружающем пространстве создаёт дополнительное магнитное поле, взаимодействующее с контуром ЧЭ и со всеми контурами КЭ. Далее производится замена сетки из проводящих нитей на электрическую схему, в которой сохраняются контуры сетки, а в ветвях между узлами включены эквивалентные сопротивления, величина которых

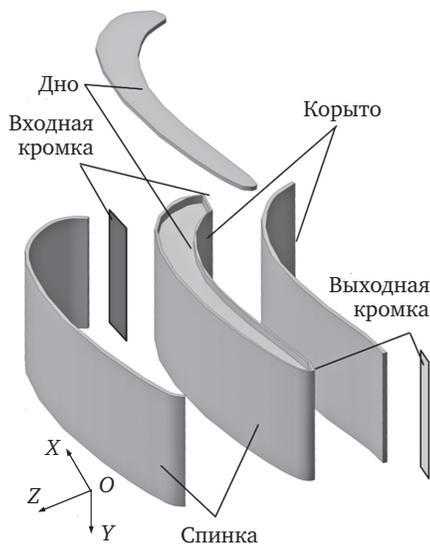


Рис. 2.4. Внешний вид лопатки и ее частей

зависит от электропроводности материала и размеров КЭ. Математическое описание процессов в эквивалентной схеме при импульсном питании ЧЭ можно представить системой дифференциальных уравнений. Число уравнений в системе будет определяться общим количеством контуров и узлов.

Завершая описание моделей с использованием КЭ, следует подчеркнуть, что реализация изложенного подхода была осуществлена лишь в упрощённом варианте, где датчики в составе кластера представлены идеализированными контурами ЧЭ без учета их объёма, а лопатки — плоской пластиной исчезающе малой толщины¹ [16, 17]. Такие упрощения приемлемы для лопаток компрессора, кривизна поверхности которых и толщина не столь существенны.

Однако для турбинной лопатки прямоугольная плоская пластина неприемлема, что вызвало необходимость разработки новой модели, в которой учтены объём и форма торцевой части лопатки, чем и отличается рассматриваемая в настоящем разделе модель от существующих [15—17]. Внешний вид такой лопатки представлен на рис. 2.4 (в центре) и в препарированном виде (на периферии). Ло-

¹ Аналогичная модель представлена и в работе [15] с тем лишь различием, что в ней используется только один контур ЧЭ.

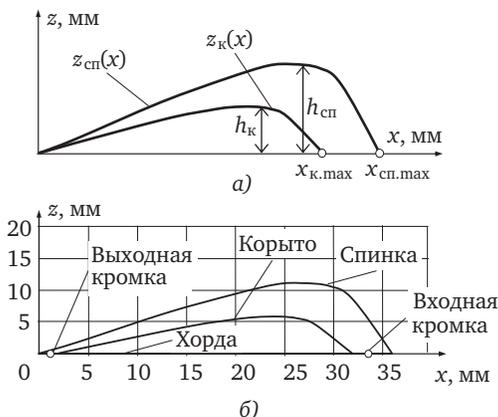


Рис. 2.5. Функции $z_{cp}(x)$ и $z_k(x)$ (а) и результаты расчета профиля лопатки (б)

патка разделена на пять частей: выпуклая и вогнутая поверхности пера лопатки, названные спинкой и корытом соответственно [20], поверхности сопряжения спинки и корыта со стороны входа и выхода газового потока — входная и выходная кромки, а также поверхность между выступами всех четырех перечисленных частей в торце лопатки, названная дном (пятая часть).

Предполагается, что толщины поверхностей спинки, корыта, входной и выходной кромок, а также дна исчезающе малы. Кроме того, принят ряд дополнительных упрощений: в отношении спинки и корыта — образующие их поверхностей — это прямые линии, которые параллельны между собой и оси Y , а также перпендикулярны плоскости поверхности дна, т.е. плоскости OXZ , причем сечения пера лопатки плоскостями, параллельными плоскости дна, одинаковы по форме и площади по высоте от корневой части до торца в направлении оси Y ; в отношении входной и выходной кромки они представлены плоскими поверхностями в форме прямоугольника, две стороны которого также параллельны оси Y .

При этом в каждом из указанных сечений пера лопатки в плоскости OXZ спинка и корыто представляются как функция $z(x)$ выражением

$$z(x) = \left(A \left(1 - e^{-\frac{x}{a}} \right) - Fx \right) h, \quad (2.14)$$

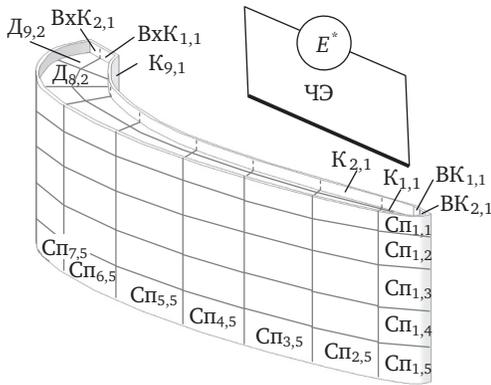


Рис. 2.6. Геометрическое представление ЧЭ и лопатки с разбиением её на КЭ при $m=9$, $n=5$, $k=2$, $p=2$, $d=2$ (E^* — ЭДС в контуре ЧЭ)

где h — максимальные прогибы спинки $h_{\text{сп}}$ и корыта $h_{\text{к}}$; A ($A_{\text{сп}}$, $A_{\text{к}}$) и a ($a_{\text{сп}}$, $a_{\text{к}}$) — коэффициенты, найденные экспериментально для спинки и корыта реальной лопатки; $F = (A/x_{\text{max}})(1 - e^{-x_{\text{max}}/a})$, в котором x_{max} ($x_{\text{сп,max}}$, $x_{\text{к,max}}$) — проекции спинки и корыта на ось X соответственно).

На рис. 2.5, а представлены графики функции $z(x)$ для спинки $z_{\text{сп}}(x)$ и корыта $z_{\text{к}}(x)$. Путем сдвига по оси X начала кривой $z_{\text{к}}(x)$ на величину ширины выходной кромки можно сформировать профиль сечения лопатки. Его изображение, полученное в результате расчета при $A_{\text{сп}} = 1,626$; $a_{\text{сп}} = 4,375$; $h_{\text{сп}} = 7,5$ мм; $x_{\text{сп,max}} = 36$ мм ($z_{\text{сп}}(x)$) и $A_{\text{к}} = 1,627$; $a_{\text{к}} = 4$ ($z_{\text{к}}(x)$); $h_{\text{к}} = 4,5$ мм; $x_{\text{к,max}} = 29$ мм ($z_{\text{к}}(x)$), а также при ширине выходной кромки 1,5 мм представлено на рис. 2.5, б. На том же рисунке показаны хорда¹, выходная и входная кромки — отрезки, равные их ширине, причем, как видно из рис. 2.5, б, оба отрезка лежат на одной прямой².

Результаты расчета координаты z распространяются на любое сечение плоскостью, параллельной плоскости OXZ , с заданной координатой y . Координаты профиля дна определяются аналогично координатам спинки и корыта.

¹ Хорда, согласно [20], это «отрезок, соединяющий точки пересечения средней линии профиля пера с профилями входной и выходной кромок пера».

² Входная и выходная кромки по форме — прямоугольники, расположенные в одной плоскости (см. рис. 2.4).

Таким образом, рассматриваемая в модели лопатка представляет собой полое тело, объём и форма которого с учетом принятых допущений соответствуют объёму и форме реально существующих конструкций турбинных лопаток, внутри которых предусмотрены полости, занимающие значительную часть объема и предназначенные для охлаждения лопаток потоком воздуха [20].

Геометрическое представление ЧЭ и лопатки приведено на рис. 2.6. ЧЭ и тоководы изображены в идеализированном виде как отрезки проводников (без учёта их объёма), образующие контур с источником импульсного напряжения¹. Предполагается также, что магнитное поле создает только ЧЭ, и влияние тока остальных проводников контура ЧЭ не учитывается.

В отличие от известных моделей [15—17], разбиение лопатки на КЭ проводится для каждой из её пяти частей отдельно, причем число КЭ в каждой части задается пользователем программы моделирования. Учитывая кривизну лопатки и тот факт, что КЭ образуются из отрезков прямых, необходимо иметь в виду негативное влияние на точность вычислений малого количества разбиений.

Формирование КЭ производится с равномерным шагом, причем количество разбиений будет одинаково по высоте лопатки от торца до корневой части для спинки, корыта, входной и выходной кромок; для спинки, корыта и дна в направлении от выходной к входной кромке; для входной, выходной кромок и дна в направлении от корыта к спинке.

Как показано на рис. 2.6, нумерация КЭ увеличивается от хвостовой к головной части и от торца к корневой части (для дна — в направлении от корыта к спинке). При этом принадлежность КЭ к каждой из пяти частей обозначается следующим образом: Сп — спинка, К — корыто, ВхК — входная кромка, ВК — выходная кромка, Д — дно. Номер КЭ определяется индексом, где первое число — порядковый номер в направлении от выходной кромки к входной (1, 2, ..., m) для КЭ спинки, корыта и дна, в направлении от спинки к корыту и от корыта к спинке для КЭ выходной (1, 2, ..., k) и входной (1, 2, ..., p) кромок соответственно; второе число — в направлении от торца к корневой части для КЭ спинки, корыта и кромок (1, 2, ..., n), для КЭ дна — в направлении от корыта к спинке (1, 2, ..., d).

¹ Это напряжение обозначено E^* и предполагается, что оно формируется на выходе ОВ СТ (см. раздел 2.1).

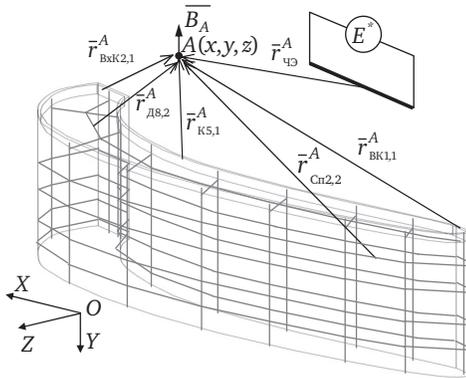


Рис. 2.7. Электрическое представление ЭМВ ЧЭ и лопатки

Для перехода от геометрического представления к электрическому все отрезки, образующие КЭ (рёбра [15]), заменяются на электропроводные нити, сохраняя при этом пространственное положение, геометрические размеры и форму лопатки.

В результате формируется объемная сетка из тонких проводящих нитей — ЭТ [15] (рис. 2.7). Точки соединения таких проводников образуют узлы, а замкнутое соединение — контуры. Каждый ЭТ создает в окружающем пространстве магнитное поле. Индукция от ЭТ в произвольной точке $A(x, y, z)$ определяется по закону Био—Савара [18]:

$$d\bar{B}_A = \frac{\mu_0 i}{4\pi r^3} [d\bar{l}, \bar{r}], \quad (2.15)$$

где i — ток в ЭТ ($d\bar{l}$); μ_0 — магнитная проницаемость воздуха (вакуума); \bar{r} — радиус-вектор от центра ЭТ до точки A , в которой определяется индукция¹; r — его модуль.

После расчета индукции для каждого контура можно найти электродвижущую силу (ЭДС):

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\bar{S}\bar{B}), \quad (2.16)$$

¹ На рис. 2.7 в качестве примера показаны несколько радиус-векторов, в обозначениях которых нижние индексы показывают принадлежность к КЭ той или иной части лопатки, а также его порядковый номер.

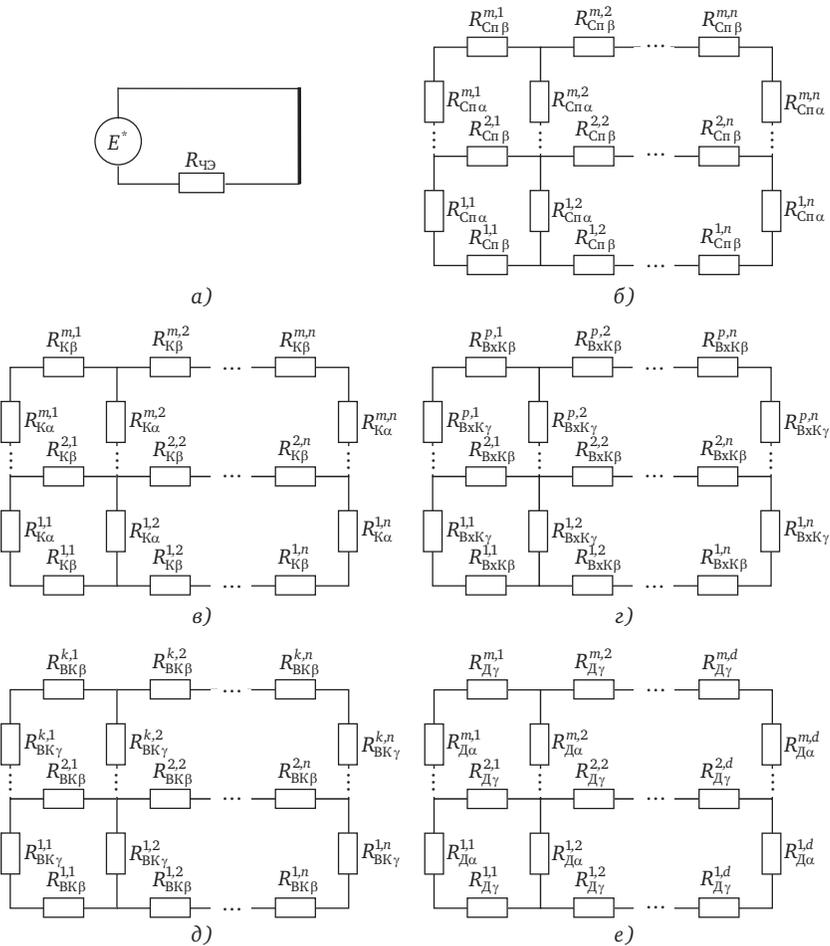


Рис. 2.8. Эквивалентные схемы контуров ЧЭ (а), спинки (б), корыта (в), входной кромки (г), выходной кромки (д), дна (е)

где ψ — потокосцепление, равное магнитному потоку Φ ; \vec{S} — вектор площади контура (направлен перпендикулярно к плоскости контура); \vec{B} — вектор индукции в центре контура.

При этом влияние контуров КЭ частей лопатки друг на друга не учитывается. Индукция вычисляется только для взаимодействия КЭ каждой части лопатки с ЧЭ и с КЭ внутри этой части.

Далее модель представляется в виде эквивалентных электрических схем (рис. 2.8).

Для этого каждая нить сетки заменяется эквивалентным омическим сопротивлением, которое определяется с учетом толщины и электропроводности материала лопатки, а также числа делений на КЭ [15]: $R_{КЭ} = \rho l / S_{КЭ}$, где ρ — удельное сопротивление материала; l , $S_{КЭ}$ — длина и площадь сечения КЭ соответственно.

Каждая часть лопатки представляется независимой эквивалентной схемой. Нумерация сопротивлений R производится аналогично нумерации КЭ, с тем лишь отличием, что названия частей находятся в нижних индексах, а порядковые номера — в верхних (рис. 2.8). Кроме того, в нижних индексах указаны признаки пространственной ориентации α, β, γ , где α — направление от выходной кромки к входной; β — от торца лопатки к ее корневой части; γ — направление от корыта к спинке.

Поведение эквивалентных схем описывает система уравнений, составленная на основе закона Кирхгофа, которая содержит уравнение контура ЧЭ, а также $m \cdot n$ уравнений контуров КЭ Сп, $p \cdot n$ уравнений контуров КЭ К, $p \cdot n$ уравнений контуров КЭ ВхК, $k \cdot n$ уравнений контуров КЭ ВК, $m \cdot d$ уравнений контуров КЭ Д.

Общее число уравнений в системе (2.17) равно $1 + 2 + 2mn + pn + kn + md$, а сама система имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Уравнение контура ЧЭ} \\ i_{КЧЭ} R_{КЧЭ} = E^* + e_{КЧЭ}, \\ \text{Уравнения контуров КЭ лопатки} \\ i_{Сп\alpha}^{12} R_{Сп\alpha}^{12} - i_{Сп\alpha}^{11} R_{Сп\alpha}^{11} + i_{Сп\beta}^{11} R_{Сп\beta}^{11} - i_{Сп\beta}^{21} R_{Сп\beta}^{21} = e_{Сп}^{11}, \\ \dots \\ i_{Сп\alpha}^{m,n+1} R_{Сп\alpha}^{m,n+1} - i_{Сп\alpha}^{m,n} R_{Сп\alpha}^{m,n} + i_{Сп\beta}^{m,n} R_{Сп\beta}^{m,n} - i_{Сп\beta}^{m+1,n} R_{Сп\beta}^{m+1,n} = e_{Сп}^{m,n}; \\ \dots \\ i_{К\alpha}^{m,n+1} R_{К\alpha}^{m,n+1} - i_{К\alpha}^{m,n} R_{К\alpha}^{m,n} + i_{К\beta}^{m,n} R_{К\beta}^{m,n} - i_{К\beta}^{m+1,n} R_{К\beta}^{m+1,n} = e_{К}^{m,n}; \\ \dots \\ i_{ВхК\gamma}^{p,n+1} R_{ВхК\gamma}^{p,n+1} - i_{ВхК\gamma}^{p,n} R_{ВхК\gamma}^{p,n} + i_{ВхК\alpha}^{p,n} R_{ВхК\alpha}^{p,n} - i_{ВхК\alpha}^{p+1,n} R_{ВхК\alpha}^{p+1,n} = e_{ВхК}^{p,n}; \\ \dots \end{array} \right. \quad (2.17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{\text{BK}\gamma}^{k,n+1} R_{\text{BK}\gamma}^{k,n+1} - i_{\text{BK}\gamma}^{k,n} R_{\text{BK}\gamma}^{k,n} + i_{\text{BK}\alpha}^{k,n} R_{\text{BK}\alpha}^{k,n} - i_{\text{BK}\alpha}^{k+1,n} R_{\text{BK}\alpha}^{k+1,n} = e_{\text{BK}}^{k,n}; \\ \dots \\ i_{\text{D}\alpha}^{m,d+1} R_{\text{D}\alpha}^{m,d+1} - i_{\text{D}\alpha}^{m,d} R_{\text{D}\alpha}^{m,d} + i_{\text{D}\gamma}^{m,d} R_{\text{D}\gamma}^{m,d} - i_{\text{D}\gamma}^{m+1,d} R_{\text{D}\gamma}^{m+1,d} = e_{\text{D}}^{m,d}, \end{array} \right.$$

где e — ЭДС в контурах ЧЭ и КЭ лопатки. При этом нижние индексы параметров e , i , R определяют принадлежность к контурам ЧЭ (КЧЭ), лопатки (СП, К, ВхК, ВК, Д) и показывают пространственную ориентацию (α , β , γ), а верхние индексы — порядковый номер КЭ.

Система уравнений, в которой ЭДС выражена через производные токов, а коэффициенты определяются электрофизическими и геометрическими параметрами, представлена выражениями:

Уравнение контура ЧЭ

$$\begin{aligned} i_{\text{KЧЭ}} R_{\text{KЧЭ}} = E^* - \frac{d}{dt} (D_{\text{KЧЭ}}^{\text{ЧЭ}} i_{\text{ЧЭ}} + D_{\text{KЧЭ}}^{\text{СП11;11}} i_{\text{СП}} + \dots + D_{\text{KЧЭ}}^{\text{СП}(m,n)} i_{\text{СП}}^{m,n} + \dots + \\ + D_{\text{KЧЭ}}^{\text{K11;11}} i_{\text{K}} + D_{\text{KЧЭ}}^{\text{K}(m,n);mn} i_{\text{K}} + D_{\text{KЧЭ}}^{\text{ВхК11;11}} i_{\text{ВхК}} + \dots + D_{\text{KЧЭ}}^{\text{ВхК}(p,n)} i_{\text{ВхК}}^{p,n} + \\ + D_{\text{KЧЭ}}^{\text{BK11;11}} i_{\text{BK}} + \dots + D_{\text{KЧЭ}}^{\text{BK}(k,n)} i_{\text{BK}} + D_{\text{KЧЭ}}^{\text{Д11;11}} i_{\text{Д}} + \dots + D_{\text{KЧЭ}}^{\text{Д}(m,d)} i_{\text{Д}}^{m,d}). \end{aligned}$$

Уравнения контуров КЭ

$$i_{\text{СП}}^{11} R_{\text{СП}}^{11} = - \frac{d}{dt} (D_{\text{СП11}}^{\text{ЧЭ}} i_{\text{ЧЭ}} + D_{\text{СП11}}^{\text{СП11}} i_{\text{СП}}^{11} + \dots + D_{\text{СП11}}^{\text{СП}(m,n)} i_{\text{СП}}^{m,n});$$

...

$$i_{\text{СП}}^{m,n} R_{\text{СП}}^{m,n} = - \frac{d}{dt} (D_{\text{СП}(m,n)}^{\text{ЧЭ}} i_{\text{ЧЭ}} + D_{\text{СП}(m,n)}^{\text{СП11}} i_{\text{СП}}^{11} + \dots + D_{\text{СП}(m,n)}^{\text{СП}(m,n)} i_{\text{СП}}^{m,n});$$

$$i_{\text{K}}^{11} R_{\text{K}}^{11} = - \frac{d}{dt} (D_{\text{K11}}^{\text{ЧЭ}} i_{\text{ЧЭ}} + D_{\text{K11}}^{\text{K11;11}} i_{\text{K}}^{11} + \dots + D_{\text{K11}}^{\text{K}(m,n)} i_{\text{K}}^{m,n});$$

...

$$i_{\text{K}}^{m,n} R_{\text{K}}^{m,n} = - \frac{d}{dt} (D_{\text{K}(m,n)}^{\text{ЧЭ}} i_{\text{ЧЭ}} + D_{\text{K}(m,n)}^{\text{K11}} i_{\text{K}}^{11} + \dots + D_{\text{K}(m,n)}^{\text{K}(m,n)} i_{\text{K}}^{m,n}); \quad (2.18)$$

$$i_{\text{ВхК}}^{11} R_{\text{ВхК}}^{11} = - \frac{d}{dt} (D_{\text{ВхК11}}^{\text{ЧЭ}} i_{\text{ЧЭ}} + D_{\text{ВхК11}}^{\text{ВхК11;11}} i_{\text{ВхК}}^{11} + \dots + D_{\text{ВхК11}}^{\text{ВхК}(p,n)} i_{\text{ВхК}}^{p,n});$$

...

$$i_{\text{ВхК}}^{p,n} R_{\text{ВхК}}^{p,n} = - \frac{d}{dt} (D_{\text{ВхК}(p,n)}^{\text{ЧЭ}} i_{\text{ЧЭ}} + D_{\text{ВхК}(p,n)}^{\text{ВхК11}} i_{\text{ВхК}}^{11} + \dots + D_{\text{ВхК}(p,n)}^{\text{ВхК}(p,n)} i_{\text{ВхК}}^{p,n});$$

$$\begin{cases}
 i_{\text{BK}}^{11} R_{\text{BK}}^{11} = -\frac{d}{dt} \left(D_{\text{BK11}}^{\text{ЧЭ}} i_{\text{ЧЭ}} + D_{\text{BK11}}^{\text{BK11}} i_{\text{BK}}^{11} + \dots + D_{\text{BK11}}^{\text{BK}(k,n)} i_{\text{BK}}^{k,n} \right); \\
 \dots \\
 i_{\text{BK}}^{k,n} R_{\text{BK}}^{k,n} = -\frac{d}{dt} \left(D_{\text{BK}(k,n)}^{\text{ЧЭ}} i_{\text{ЧЭ}} + D_{\text{BK}(k,n)}^{\text{BK11}} i_{\text{BK}}^{11} + \dots + D_{\text{BK}(k,n)}^{\text{BK}(k,n)} i_{\text{BK}}^{k,n} \right); \\
 i_{\text{Д}}^{11} R_{\text{Д}}^{11} = -\frac{d}{dt} \left(D_{\text{Д11}}^{\text{ЧЭ}} i_{\text{ЧЭ}} + D_{\text{Д11}}^{\text{Д11}} i_{\text{Д}}^{11} + \dots + D_{\text{Д11}}^{\text{Д}(m,d)} i_{\text{Д}}^{m,d} \right); \\
 \dots \\
 i_{\text{Д}}^{m,d} R_{\text{Д}}^{m,d} = -\frac{d}{dt} \left(D_{\text{Д}(m,d)}^{\text{ЧЭ}} i_{\text{ЧЭ}} + D_{\text{Д}(m,d)}^{\text{Д11}} i_{\text{Д}}^{11} + \dots + D_{\text{Д}(m,d)}^{\text{Д}(m,d)} i_{\text{Д}}^{m,d} \right),
 \end{cases}$$

где D — коэффициенты с размерностью индуктивности, которые вычисляются с помощью выражений (2.15), (2.16) и зависят от параметров $\mu_0, \bar{S}, d\bar{l}, r, \bar{r}^1$, причем нижний индекс этого коэффициента

¹ Ниже приведены коэффициенты D системы уравнений (2.18) на примере расчета для КЧЭ и одного из контуров КЭ в каждой из частей имитатора лопатки:

От КЧЭ к самому себе

$$D_{\text{КЧЭ}}^{\text{ЧЭ}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \bar{S}_{\text{КЧЭ}} \cdot \frac{[d\bar{l}_{\text{ЧЭ}}^{\text{ЧЭ}}, \bar{r}_{\text{ЧЭ}}^{\text{ЧЭ}}]}{(r_{\text{ЧЭ}}^{\text{ЧЭ}})^3}.$$

От контура спинки лопатки к КЧЭ

$$D_{\text{Сп}(m,n)}^{\text{КЧЭ}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \bar{S}_{\text{КЧЭ}} \left(\frac{[d\bar{l}_{\text{Сп}\alpha}^{m,n}, \bar{r}_{\text{Сп}\alpha(m,n)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{Сп}\alpha(m,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{[d\bar{l}_{\text{Сп}\alpha}^{m+1,n}, \bar{r}_{\text{Сп}\alpha(m+1,n)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{Сп}\alpha(m+1,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{[d\bar{l}_{\text{Сп}\beta}^{m,n}, \bar{r}_{\text{Сп}\beta(m,n)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{Сп}\beta(m,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{[d\bar{l}_{\text{Сп}\beta}^{m,n+1}, \bar{r}_{\text{Сп}\beta(m,n+1)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{Сп}\beta(m,n+1)}^{\text{КЧЭ}})^3} \right).$$

От контура корыта лопатки к КЧЭ

$$D_{\text{К}(m,n)}^{\text{КЧЭ}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \bar{S}_{\text{КЧЭ}} \left(\frac{[d\bar{l}_{\text{К}\alpha}^{m,n}, \bar{r}_{\text{К}\alpha(m,n)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{К}\alpha(m,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{[d\bar{l}_{\text{К}\alpha}^{m+1,n}, \bar{r}_{\text{К}\alpha(m+1,n)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{К}\alpha(m+1,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{[d\bar{l}_{\text{К}\beta}^{m,n}, \bar{r}_{\text{К}\beta(m,n)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{К}\beta(m,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{[d\bar{l}_{\text{К}\beta}^{m,n+1}, \bar{r}_{\text{К}\beta(m,n+1)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{К}\beta(m,n+1)}^{\text{КЧЭ}})^3} \right).$$

От контура входной кромки лопатки к КЧЭ

$$D_{\text{ВхК}(p,n)}^{\text{КЧЭ}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \bar{S}_{\text{КЧЭ}} \left(\frac{[d\bar{l}_{\text{ВхК}\gamma}^{p,n}, \bar{r}_{\text{ВхК}\gamma(p,n)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{ВхК}\gamma(p,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{[d\bar{l}_{\text{ВхК}\gamma}^{p+1,n}, \bar{r}_{\text{ВхК}\gamma(p+1,n)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{ВхК}\gamma(p+1,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{[d\bar{l}_{\text{ВхК}\beta}^{p,n}, \bar{r}_{\text{ВхК}\beta(p,n)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{ВхК}\beta(p,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{[d\bar{l}_{\text{ВхК}\beta}^{p,n+1}, \bar{r}_{\text{ВхК}\beta(p,n+1)}^{\text{КЧЭ}}]}{(r_{\text{ВхК}\beta(p,n+1)}^{\text{КЧЭ}})^3} \right).$$

D определяет контур КЭ, для которого рассчитывается индукция, а верхний — контур ЧЭ, в котором вычисляется индукция; нижние индексы токов i и сопротивлений R определяют принадлежность к контуру ЧЭ или части лопатки (Сп, К, ВхК, ВК, Д), а верхний — порядковый номер контура.

Решение системы уравнений (2.18) обеспечивает получение зависимости токов от времени. Информативный параметр — эквивалентная индуктивность контура ЧЭ, которая согласно [15—17] также является функцией времени

$$L_{\text{ЧЭ}}^{\text{э}}(t) = \frac{\Phi(t)}{i_{\text{ЧЭ}}(t)}. \quad (2.19)$$

Фиксируя значение индуктивности в заданный момент времени для заданных значений параметров ЧЭ ОВТД в составе кластера и лопатки, можно получить семейство ФП ($L_{\text{ЧЭ}1}^{\text{э}}(x, y)$, $L_{\text{ЧЭ}2}^{\text{э}}(x, y)$).

Вычислительные эксперименты по исследованию ЭМВ ЧЭ и лопатки были выполнены для значений параметров, приведенных в табл. 2.1. Взаимное расположение ЧЭ и лопатки, а также системы отсчета представлены на рис. 2.9, что соответствует *meth* 1 и рис. 1.4. При этом хорда сечения лопатки повернута на угол 37° от оси Z по часовой стрелке (как и хорды реальных лопаток рабочего колеса

От контура выходной кромки лопатки к КЧЭ

$$D_{\text{ВК}(k,n)}^{\text{КЧЭ}} = \frac{\mu_0 \bar{S}_{\text{КЧЭ}}}{4\pi} \left(\frac{\left[\frac{d\bar{l}_{\text{ВК}\gamma}^{k,n}, \bar{r}_{\text{ВК}\gamma}^{\text{КЧЭ}}}{(r_{\text{ВК}\gamma(k,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{\left[\frac{d\bar{l}_{\text{ВК}\gamma}^{k+1,n}, \bar{r}_{\text{ВК}\gamma}^{\text{КЧЭ}}}{(r_{\text{ВК}\gamma(k+1,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} \right]}{\left(r_{\text{ВК}\gamma(k,n)}^{\text{КЧЭ}} \right)^3} \right) + \frac{\left[\frac{d\bar{l}_{\text{ВК}\beta}^{k,n}, \bar{r}_{\text{ВК}\beta}^{\text{КЧЭ}}}{(r_{\text{ВК}\beta(k,n)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{\left[\frac{d\bar{l}_{\text{ВК}\beta}^{k,n+1}, \bar{r}_{\text{ВК}\beta}^{\text{КЧЭ}}}{(r_{\text{ВК}\beta(k,n+1)}^{\text{КЧЭ}})^3} \right]}{\left(r_{\text{ВК}\beta(k,n)}^{\text{КЧЭ}} \right)^3} \right) \right)}.$$

От контура дна лопатки к КЧЭ

$$D_{\text{Д}(m,d)}^{\text{КЧЭ}} = \frac{\mu_0 \bar{S}_{\text{КЧЭ}}}{4\pi} \left(\frac{\left[\frac{d\bar{l}_{\text{Д}\alpha}^{m,d}, \bar{r}_{\text{Д}\alpha}^{\text{КЧЭ}}}{(r_{\text{Д}\alpha(m,d)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{\left[\frac{d\bar{l}_{\text{Д}\alpha}^{m+1,d}, \bar{r}_{\text{Д}\alpha}^{\text{КЧЭ}}}{(r_{\text{Д}\alpha(m+1,d)}^{\text{КЧЭ}})^3} \right]}{\left(r_{\text{Д}\alpha(m,d)}^{\text{КЧЭ}} \right)^3} \right) + \frac{\left[\frac{d\bar{l}_{\text{Д}\gamma}^{m,d}, \bar{r}_{\text{Д}\gamma}^{\text{КЧЭ}}}{(r_{\text{Д}\gamma(m,d)}^{\text{КЧЭ}})^3} + \frac{\left[\frac{d\bar{l}_{\text{Д}\gamma}^{m,d+1}, \bar{r}_{\text{Д}\gamma}^{\text{КЧЭ}}}{(r_{\text{Д}\gamma(m,d+1)}^{\text{КЧЭ}})^3} \right]}{\left(r_{\text{Д}\alpha(m,d)}^{\text{КЧЭ}} \right)^3} \right) \right)},$$

где нижние индексы параметра $d\bar{l}$ определяют принадлежность к КЧЭ, лопатки (Сп, К, ВхК, ВК, Д) и показывают пространственную ориентацию (α, β, γ), а верхние индексы — порядковый номер КЭ; нижний индекс коэффициента D и параметров \bar{r}, r определяет контур КЭ, для которого рассчитывается индукция, а верхний — контур КЭ, в котором вычисляется индукция.

Таблица 2.1. Значения параметров ЧЭ и лопатки

Параметры	Значения
Ширина контура ЧЭ (длина ЧЭ), мм	8
Длина контура ЧЭ, мм	7
Длина хорды лопатки, мм	36
Высота спинки, мм	7,5
Высота корыта, мм	4,5
Длина пера, мм	10
Ширина входной кромки, мм	4
Ширина выходной кромки, мм	3
Число разбиений на КЭ по длине пера m	10
Число разбиений на КЭ по ширине спинки и корыта n	36
Число разбиений на КЭ по ширине выходной кромки p	2
Число разбиений на КЭ по ширине входной кромки k	2
Число разбиений на КЭ по ширине дна d	2
Удельное сопротивление ρ материала лопатки (коррозионно-стойкая сталь), Ом·м	$0,6 \cdot 10^{-6}$

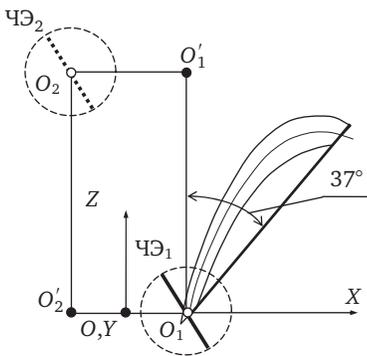


Рис. 2.9. Взаимное расположение ЧЭ и лопатки, а также система отсчета

турбины, значения параметров которых соответствуют приведенным в табл. 2.1).

При этом в расчетах, связанных с получением временных зависимостей токов и эквивалентной индуктивности, положение середины ВК было выбрано в центре ЧЭ₁ ($x = 1$ мм; $y = 0,5$ мм; $z = 0$ мм). Можно утверждать, что при заданных и неизменных значениях параметров ЧЭ и лопатки коэффициенты D в системе уравнений (2.18) являются собственными индуктивностями контуров, что позволяет найти минимальное значение времени и выбрать временной шаг для вычисления функции $L_{\text{ЧЭ}}^3(t)$. Этот шаг выбран равным 0,1 нс.

Необходимо отметить, что в табл. 2.1 отсутствует один из наиболее важных параметров модели — это толщина спинки, корыта и всех остальных частей лопатки. Толщина определяет сопротивление R в каждом из КЭ и оказывает влияние на величину токов в контурах КЭ, длительность их затухания и на характер изменения во времени эквивалентной индуктивности ЧЭ.

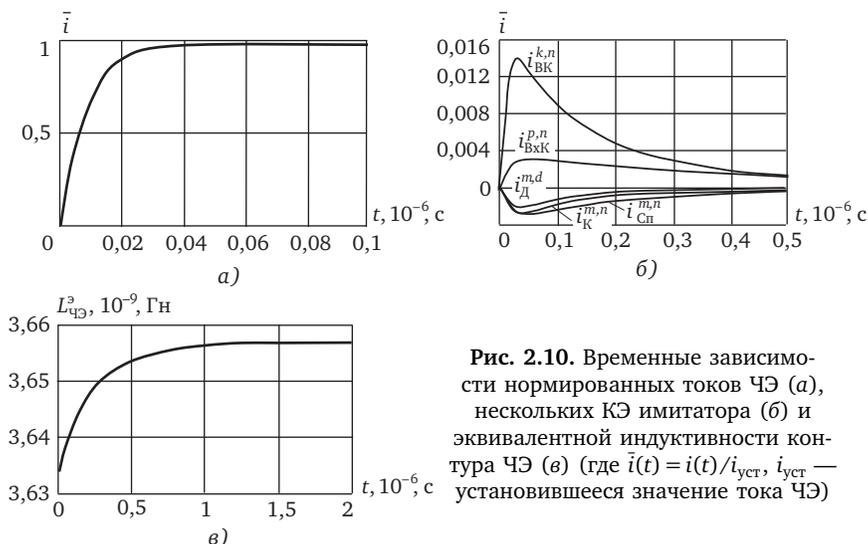


Рис. 2.10. Временные зависимости нормированных токов ЧЭ (а), нескольких КЭ имитатора (б) и эквивалентной индуктивности контура ЧЭ (в) (где $\bar{i}(t) = i(t)/i_{\text{уст}}$, $i_{\text{уст}}$ — установившееся значение тока ЧЭ)

При выборе толщины приходится ориентироваться на существующие данные о глубине проникновения вихревых токов в металлы на различных частотах, однако в рассматриваемой модели их использование не обеспечивает окончательного результата. Поэтому в процессе моделирования задаются несколькими значениями этого параметра (например, 1; 0,1 и 0,01 мм), а из них выбирают то значение, при котором наблюдается наилучшее совпадение с результатами эксперимента¹.

Приведенные ниже результаты моделирования получены в предположении, что толщина КЭ всех частей имитатора лопатки составляет 0,1 мм.

Характер временных зависимостей тока контура ЧЭ и токов контуров лопатки аналогичен приведенным в работах [1, 2, 15—17] зависимостям. Ток контура ЧЭ близок к экспоненциально-нарастающей зависимости² (рис. 2.10, а). Что касается вихревых токов контуров

¹ Имеются в виду исследования изменений во времени выходных напряжений ИЦ, полученных экспериментально и путем моделирования. Их подробное описание приведено в разделе 3, где предлагаемая методика эксперимента обеспечивает приемлемую верификацию полученных результатов моделирования.

² Отклонение от экспоненциальной зависимости незначительно и связано с влиянием вихревых токов контуров лопатки, величина которых на несколько порядков меньше тока контура ЧЭ.

лопатки, то они нарастают в начале переходного процесса, а затем уменьшаются до нуля, определяя характер изменения эквивалентной индуктивности контура ЧЭ во времени (рис. 2.10, б). Эти изменения $L_{\text{ЧЭ}}^3(t)$ представлены на рис. 2.10, в: в начале переходного процесса индуктивность минимальна, но после затухания вихревых токов в лопатке она возрастает и становится равной собственной индуктивности контура ЧЭ. При этом начальные изменения индуктивности определяют ее информативное содержание, связанное с положением лопатки относительно ЧЭ. Поэтому для таких измерений целесообразно использовать значение $L_{\text{ЧЭ}}^3(t)$, максимально приближенное к началу переходного процесса в контуре ЧЭ. Обычно это время не превышает $0,2 \cdot 10^{-6}$ с (подробнее — в разделе 3)¹.

В заключение следует отметить, что на качественном уровне характер изменений во времени эквивалентной индуктивности контура ЧЭ не изменится, если топология размещения ЧЭ будет соответствовать *meth 2* (рис. 1.6). При этом количественные изменения имеют место, но в настоящем разделе не рассматриваются, поскольку более подробное описание их влияния приводится ниже в разделе 3.

2.3. Модель трансформации эквивалентной индуктивности чувствительного элемента в первичную обмотку согласующего трансформатора

Если предположить, что лопатка находится вне зоны чувствительности ОВТД, т.е. координаты смещений ее торцевой части $x, y, z \rightarrow \infty$, то переходные процессы в первичной обмотке СТ, ОВ и ЧЭ определяются системой уравнений (2.1) и параметрами эквивалентной схемы на рис. 2.1 (L_1, L_2, R_1, R_2).

Вместе с тем можно считать, что изменения тока в первичной обмотке СТ ($i_1(t)$) связаны с эквивалентной индуктивностью первичной обмотки L_1^3 , которая, в свою очередь, определяется параметрами эквивалентной схемы, включая $L_{\text{ЧЭ}}$, а также изменяется во времени².

¹ Следует отметить, что для получения функции $L_{\text{ЧЭ}}^3(t)$ не имеет значения величина ступенчатого возмущения $E^*(t)$. При необходимости количественной оценки токов в контуре ЧЭ и контурах КЭ можно воспользоваться экспериментальными данными, представленными на осциллограмме $U_{\text{ЧЭ}}(t)$, полагая, что $E^*(t) \approx U_{\text{ЧЭ}}(t)$ (см. раздел 2.4, рис. 2.12, а) или выбирая величину ступени в диапазоне от 10 до 15 мВ.
² Здесь просматривается аналогия с эквивалентной индуктивностью ЧЭ, которая зависит от LR -параметров контуров КЭ и цепи питания (см. раздел 2.2).

С учетом выражений (2.2) и в соответствии с работой [4] эквивалентную индуктивность можно представить в операторном виде:

$$L_1^{\text{э}}(p) = \frac{\Psi_1(p)}{i_1(p)} = \frac{L_1 i_1(p) - M i_2(p)}{i_1(p)}. \quad (2.20)$$

С помощью выражений (2.3) ток $i_2(p)$ выражается через ток $i_1(p)$:

$$i_2(p) = i_1(p) \frac{Mp}{L_2 p + L_{\text{чЭ}} p + R_2},$$

после его подстановки в (2.20) эквивалентная индуктивность $L_1^{\text{э}}(p)$ примет вид:

$$L_1^{\text{э}}(p) = \frac{L_1 L_2 p + L_1 L_{\text{чЭ}} p + L_1 R_2 - M^2 p}{L_2 p + L_{\text{чЭ}} p + R_2},$$

или с учетом $M = k_{\text{св}} \sqrt{L_1 L_2}$:

$$L_1^{\text{э}}(p) = L_1 \left[\frac{L_{\text{чЭ}} + (1 - k_{\text{св}}^2) L_2}{L_{\text{чЭ}} + L_2} \cdot \frac{p}{p + \frac{1}{\tau}} + \frac{1}{\tau} \cdot \frac{1}{p + \frac{1}{\tau}} \right], \quad (2.21)$$

где $\tau = (L_2 + L_{\text{чЭ}}) / R_2$ — постоянная времени вторичного контура СТ.

Оригинал выражения (2.21), т.е. эквивалентная индуктивность первичной обмотки СТ как функция времени представляется формулой

$$L_1^{\text{э}}(t) = L_1 \left[1 - \frac{k_{\text{св}}^2}{1 + (L_{\text{чЭ}} / L_2)} e^{(-t/\tau)} \right]. \quad (2.22)$$

График функции $L_1^{\text{э}}(t)$ датчика, переходные характеристики которого представлены на рис. 2.2, был получен расчетным путем для тех же исходных данных с помощью выражения (2.22) и изображен на рис. 2.11, а (графики $U_{\text{п}}(t)$ и $i_1(t)$ дублируют соответствующие графики рис. 2.2).

В идеальной ИЦ, реализующей метод ПП, эквивалентная индуктивность должна фиксироваться в момент времени $t = 0$.

Тогда

$$L_1^{\text{э}}(0) = L_1 \left[1 - \frac{k_{\text{св}}^2}{1 + (L_{\text{чЭ}} / L_2)} \right]. \quad (2.23)$$

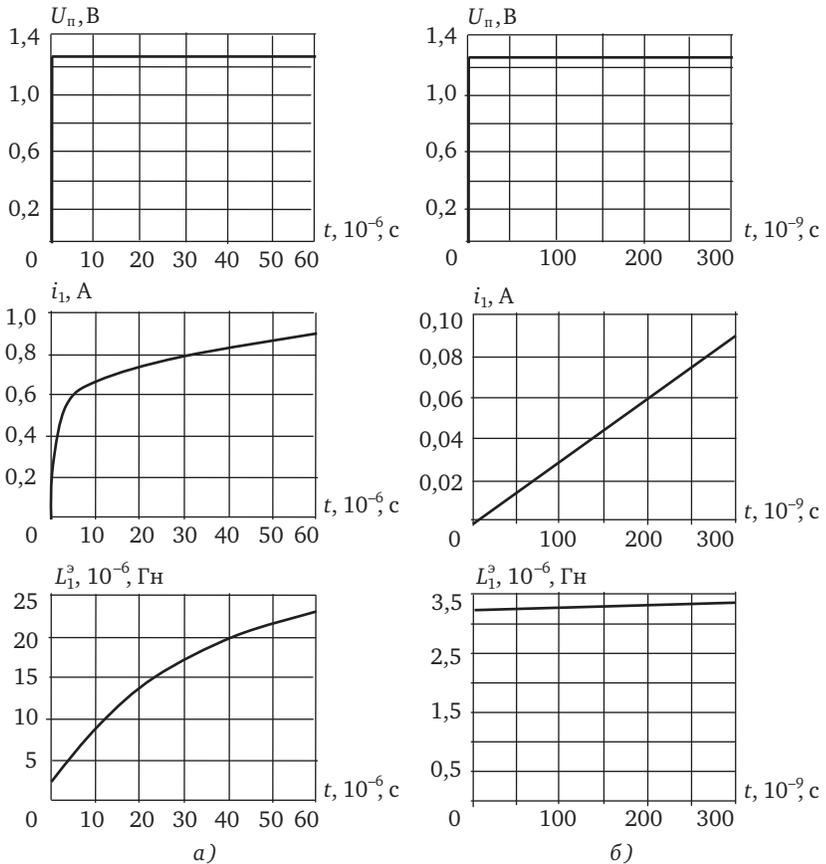


Рис. 2.11. Изменение эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ в ходе переходного процесса (а) и на его начальном участке (б)

Следует отметить, что в ОВТД с ферритовым магнитопроводом индуктивность ЧЭ значительно меньше индуктивности ОБ ($L_{\text{чЭ}} \ll L_2$). Тогда, с учетом $k_{\text{св}} = 1$, второе слагаемое в квадратных скобках (2.23) можно разложить в степенной ряд Маклорена, ограничившись двумя членами [21]:

$$\frac{k_{\text{св}}^2}{1 + (L_{\text{чЭ}}/L_2)} = \frac{1}{1 + (L_{\text{чЭ}}/L_2)} \approx 1 - (L_{\text{чЭ}}/L_2). \quad (2.24)$$

С учетом (2.24) выражение (2.23) примет вид:

$$L_1^3 = \frac{L_1}{L_2} L_{\text{ЧЭ}}. \quad (2.25)$$

Полагая, что $L_1 = w_1^2/R_{\text{магн}}$, $L_2 = w_2^2/R_{\text{магн}}$, где w_1 — число витков первичной обмотки СТ, а $w_2 = 1$ (ОВ), $R_{\text{магн}}$ — магнитное сопротивление магнитопровода, выражение (2.25) можно представить в виде:

$$L_1^3 = n_T^2 L_{\text{ЧЭ}}, \quad (2.26)$$

где $n_T = w_1/w_2 = w_1$ — коэффициент трансформации СТ (см. раздел 1).

Вместе с тем в реальной ИЦ, построенной на основе метода ПП, время преобразования составляет 0,06 мкс (см. раздел 3), но может быть доведено примерно до 0,1 мкс и даже 0,2 мкс. При этом изменения функции $L_1^3(t)$ в пределах 0...0,1 мкс и 0...0,2 мкс составляет не более 2,5 и 5,0% соответственно (рис. 2.11, б).

Это означает, что при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика эквивалентную индуктивность можно считать постоянной во времени в начальной области переходного процесса и равной $L_1^3(0)$ (с указанной степенью приближения).

Напротив, наличие лопатки в зоне чувствительности датчика приводит к изменению эквивалентной индуктивности ЧЭ $L_{\text{ЧЭ}}^3$ во времени и, как следствие, соответствующим изменениям L_1^3 , связанным с вихревыми токами в торцевой части лопатки. Но эти изменения невелики и составляют десятые доли процента.

2.4. Результаты экспериментальных исследований переходных процессов в датчике и оценка эквивалентных параметров первичной обмотки согласующего трансформатора

Экспериментальные исследования переходных процессов были проведены на аналогичной по своим параметрам конструкции ОВТД, в которой СТ выполнен на ферритовом магнитопроводе. Результаты эксперимента (рис. 2.12), демонстрируя в целом идентичность в характере изменений тока i_1 и напряжения $U_{\text{ЧЭ}}$ во времени с расчетным, показали значительное расхождение по значениям. Структурная схе-

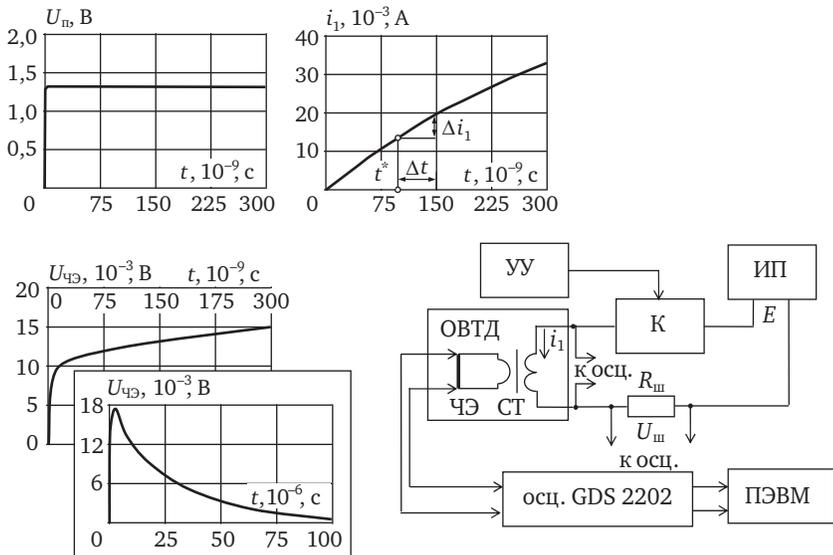


Рис. 2.12. Результаты экспериментальных исследований, структурная схема и оборудование стенда для проведения исследований

ма и оборудование стенда для проведения исследований также представлена на рис. 2.12.

В состав стенда входит источник питания (ИП) постоянного напряжения ($E = 1,25$ В), бесконтактный ключ (К) на униполярном транзисторе (FDG 6306P) с устройством управления (УУ), обеспечивающим импульсное напряжение прямоугольной формы переменной длительности, цифровой осциллограф (осц.) GDS 2202 с выходом на ПЭВМ.

Из осциллограммы напряжения на первичной обмотке СТ $U_{п}(t)$ видно, что длительность его переднего фронта невелика и составляет около 0,005 мкс, а передний фронт на ЧЭ не более 0,010... 0,015 мкс.

Осциллограмма тока первичной обмотки ($i_1(t)$) получена с помощью токового шунта малого омического сопротивления ($R_{ш} = 0,1$ Ом) по падению напряжения на нем ($i_1(t) = U_{ш}(t)/R_{ш}$).¹

¹ Осциллограммы напряжений ($U_{п}(t)$, $U_{чз}(t)$, $U_{ш}(t)$) были предварительно обработаны (фильтрация помех, сглаживание и коррекция длительности переднего фронта $U_{чз}(t)$).

Возвращаясь к сравнению результатов расчетов и экспериментальных исследований токов и напряжений, следует отметить, что существенные отличия в полученных значениях этих параметров связаны с несовершенством модели, идеализирующей поведение датчика в переходном процессе, возбуждаемом импульсным напряжением на первичной обмотке СТ.

В этой модели, в частности, не учитывается влияние индуктивности ТВ, которая в расчетах принималась нулевой ($L_{ТВ} = 0$). Вместе с тем можно предположить, что применяемая технология изготовления ТВ и слоя изоляции между ними в опытных образцах ОВТД не в полной мере отвечала всем необходимым техническим условиям. Это могло стать причиной существенного увеличения $L_{ТВ}$ до величины $L_{ЧЭ}$ и более. Поскольку в самом начале переходного процесса напряжение на ЧЭ определяется, в основном, соотношением индуктивностей ЧЭ и ТВ, т.е. $U_{ЧЭ} \approx [L_{ЧЭ}/(L_{ЧЭ} + L_{ТВ})]U_2$, где U_2 — напряжение на ОВ СТ, то, полагая $L_{ТВ} \approx 2L_{ЧЭ}$, можно получить напряжение на ЧЭ примерно втрое меньше, чем в расчетах (см. рис. 2.2 и 2.12).

Поскольку рассматриваемые эксперименты выполнялись при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика, то эквивалентная индуктивность ЧЭ не меняется во времени и при импульсном питании определяется установившемся значением (при $t \rightarrow \infty$) $L_{ЧЭ,\infty}^3 = 3,657 \cdot 10^{-9}$ Гн. Тогда $L_{ТВ} \approx 2L_{ЧЭ,\infty}^3$, а эквивалентная индуктивность первичной обмотки СТ в соответствии с (2.26):

$$L_1^3 \approx n_1^2 (3L_{ЧЭ,\infty}^3), \quad (2.27)$$

т.е. $9,96 \cdot 10^{-6}$ Гн (индуктивность первичной обмотки СТ, измеренная прибором Е7-12, составляет $9,47 \cdot 10^{-6}$ Гн).

Следует отметить, что последовательность перечисленных выше операций, в том числе сравнения напряжений на ЧЭ, полученных на модели и экспериментально, определение величины индуктивности ТВ (принятых в модели «безындуктивными») и трансформация суммы индуктивностей ТВ и ЧЭ (с помощью выражения (2.27)), можно квалифицировать как способ оценки эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика [4, 13].

Если время преобразования в ИЦ, реализующей метод ПП, действительно невелико, то при наличии лопатки в зоне чувствитель-

ности датчика переменную во времени эквивалентную индуктивность ЧЭ $L_{\text{ЧЭ}}^3(t)$, полученную в результате моделирования ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки (см. раздел 2.2), также можно трансформировать в переменную во времени эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ:

$$L_1^3(t) = n_T^2 \left[2L_{\text{ЧЭ},\infty}^3 + L_{\text{ЧЭ}}^3(t) \right], \quad (2.28)$$

а полученную функцию использовать в процессе моделирования ИЦ.

Кроме того, сравнивая результаты эксперимента и моделирования, необходимо подчеркнуть, что расчёт омических сопротивлений элементов конструкции ОВТД выполнялся по упрощённой формуле с учётом геометрических размеров и электропроводности материала. При этом остались неучтенными вихревые токи, возникающие в ОВ, ТВ и ЧЭ, которые в наибольшей степени проявляются в начале переходного процесса.

Что касается омических сопротивлений, то наибольшее отличие в результатах расчета можно ожидать в ТВ из-за малой площади контакта с ЧЭ и связанной с этим повышенной плотностью тока в той части сечений ТВ, которые примыкают к ЧЭ, что, в конечном счете, приводит к уменьшению эффективной площади сечения и увеличению сопротивления.

Наличие вихревых токов также приводит к уменьшению площади сечения, через которое протекает ток в каждом элементе и, как следствие, увеличению сопротивления и соответствующему уменьшению тока i_2 в контуре, включающем ОВ, ТВ и ЧЭ.

Увеличение сопротивления за счет суммарного эффекта влияния обоих факторов может быть причиной увеличения $U_{\text{ЧЭ}}(t)$ в интервале времени 0...4 мкс, по истечении которого начинается уменьшение $U_{\text{ЧЭ}}(t)$ (рис. 2.12, «апликация»). В отличие от экспериментальных, расчетные значения $U_{\text{ЧЭ}}(t)$ монотонно уменьшаются с момента времени $t = 0$ (см. рис. 2.2).

Разумеется, увеличение сопротивлений ОВ, ТВ и ЧЭ приводит к изменению эквивалентного сопротивления первичной обмотки СТ¹. Чтобы получить его количественные оценки расчетным путем, необходимы модели поведения ОВ, ТВ и ЧЭ как на постоянном токе,

¹ Активное сопротивление первичной обмотки СТ, измеренное прибором Е7-12 (на частоте 1,0 МГц) составляет 19,6 Ом.

так и в переходном режиме, позволяющие определить распределение токов по сечению каждого из перечисленных элементов. Однако на сегодняшний день такие модели находятся лишь в стадии разработки.

В то же время при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика с известной степенью приближения эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ можно считать постоянной [см. (2.27)].

При таком допущении предлагается способ экспериментальной оценки эквивалентного сопротивления первичной обмотки СТ (R^3). Найти R^3 можно из уравнения переходного процесса в цепи первичной обмотки СТ, представленной эквивалентными индуктивностью L_1^3 и сопротивлением R^3 (при подаче ступенчатого напряжения $U_{\Pi}(t)$):

$$L_1^3 \frac{di_1(t)}{dt} + R^3 i_1(t) = U_{\Pi}(t).$$

Полагая, что $di_1(t)/dt \approx \Delta i / \Delta t$, а Δi , Δt и i_1 (в фиксируемый момент времени t^*) определяются по данным осциллограммы $i_1(t)$ (рис. 2.12), вычисление эквивалентного сопротивления производится по формуле:

$$R^3 = \frac{U_{\Pi}(t) - L_1^3 (\Delta i_1 / \Delta t)}{i_1(t^*)}. \quad (2.29)$$

Тогда вычисленные значения R^3 при t^* , равном 0,1 и 0,2 мкс, будут мало отличаться друг от друга, а их среднее значение составит 17,2 Ом при расхождении с экспериментальными данными, полученными на приборе Е7-12, около 10%.

2.5. Семейства функций преобразования датчиков в составе кластера

Семейства ФП рассматриваются применительно к обоим методам, изложенным в разделе 1 (последовательно для *meth 1* и *meth 2*), и характеризуют этап первичного преобразования на уровне датчика, представляя собой зависимости эквивалентных индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ или первичных обмоток СТ₁ и СТ₂ от координат смещений x и y .

Согласно *meth 1* в процессе вращения рабочего колеса (в направлении оси Z) производится фиксация минимальных значений

индуктивностей обоих ЧЭ в соответствующие моменты времени ($t_{\min 1}$, $t_{\min 2}$, рис. 1.5). Можно утверждать, что при равномерном вращении минимальным значениям индуктивностей ЧЭ будут соответствовать координаты $z_{\min 1}$ и $z_{\min 2}$, величины которых пропорциональны значениям $t_{\min 1}$ и $t_{\min 2}$. Это означает, что одним из условий реализации *meth 1* является наличие одного минимума на каждой из двух зависимостей индуктивностей от координат. И последующие моделирование, и экспериментальные исследования призваны подтвердить тот факт, что при выбранном угловом развороте обоих ЧЭ относительно оси Z , а также заданном положении хорды лопадки действительно наблюдаются единичные минимумы таких функций.

При этом следует иметь в виду, что рассматриваемые ФП являются статическими характеристиками, полученными для заданных x , y -координат, не изменяющихся во времени, а минимумы индуктивностей фиксируются при значениях координат $z_{\min 1}$, $z_{\min 2}$, также постоянных во времени.

Вместе с тем эквивалентные индуктивности ЧЭ, равно как соответствующие им эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ, представлены функциями времени (см. разделы 2.2 и 2.3). Однако по соображениям, изложенным в разделе 3, где рассматриваются ИЦ, в качестве информативной индуктивности предлагается использовать её значения в момент окончания прямоугольного импульса питания ИЦ, длительность которого обычно не превышает 0,2 мкс. В последующих вычислительных экспериментах это время было выбрано равным 0,06 мкс, причем минимальным значениям информативной индуктивности в статике соответствуют координаты $z_{\min 1}$, $z_{\min 2}$, а в процессе вращения рабочего колеса — практически и моменты времени $t_{\min 1}$, $t_{\min 2}$.

Рис. 2.13 иллюстрирует получение таких функций в предположении, что ЧЭ₁ является рабочим, а ЧЭ₂ — компенсационным (рис. 2.13, а) и в предположении, что рабочим является ЧЭ₂, а компенсационным — ЧЭ₁ (рис. 2.13, б). Кроме того, предполагается, что координаты центров ЧЭ₁ (точка O_1) и ЧЭ₂ (точка O_2) по оси X составляют +1 и -1 мм соответственно. Расчет функций $L_{\text{ЧЭ}1}^3(z)$ и $L_{\text{ЧЭ}2}^3(z)$ производится для трех значений координаты x (-1; 0; +1 мм) при $y = 0,5$ мм (на рис. 2.13 показаны перемещения лопадки по оси Z при $x = 0$ (что соответствует положению центра ВК на оси Z)). Угол

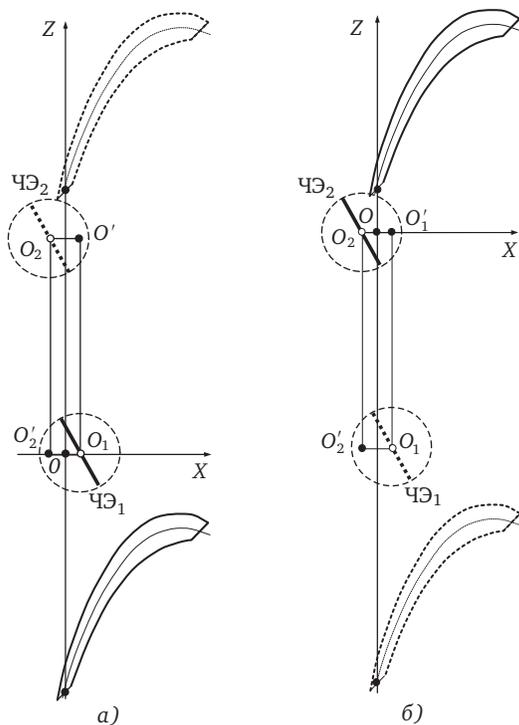


Рис. 2.13. Смещение лопатки по оси Z относительно рабочих ЧЭ:
 а — ЧЭ₁; б — ЧЭ₂

разворота ЧЭ составляет 30° против часовой стрелки. Результаты вычислительных экспериментов представлены на рис. 2.14. Они подтверждают наличие единственного минимума на каждой из зависимостей в семействах $L_{ЧЭ1}^3(z)$ и $L_{ЧЭ2}^3(z)$.

Аналогичные результаты наблюдаются и при увеличении угла разворота ЧЭ₁ и ЧЭ₂ до 60° , но величина минимального значения индуктивности ($\min L_{ЧЭ1}^3$ и $\min L_{ЧЭ2}^3$) увеличивается, что отрицательно влияет на чувствительность ОВТД к изменениям координат x и y .

Далее приводятся результаты вычислительных экспериментов, связанных с получением семейств ФП ЧЭ₁ и ЧЭ₂ ($L_{ЧЭ1}^3(x, y)$ и $L_{ЧЭ2}^3(x, y)$). Размещение центров ЧЭ₁ и ЧЭ₂ на оси X представлено на рис. 2.15 и соответствует рис. 2.13 (+1 и -1 мм). Тот же рис. 2.15 иллюстрирует смещение лопатки по оси X в диапазоне ± 1 мм.

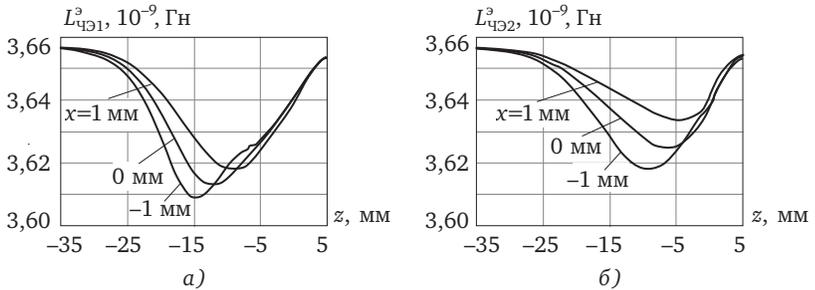


Рис. 2.14. Семейства $L_{\text{ЧЭ1}}^{\text{э}}(z)$ (а) и $L_{\text{ЧЭ2}}^{\text{э}}(z)$ (б) при угловом положении ЧЭ 30° относительно оси Z

Результаты вычислений представлены как семейства ФП $L_{\text{ЧЭ1}}^{\text{э}}(x)$ при $y = \text{const}$ и $L_{\text{ЧЭ1}}^{\text{э}}(y)$ при $x = \text{const}$ (рис. 2.16, а), а также $L_{\text{ЧЭ2}}^{\text{э}}(x)$ при $y = \text{const}$ и $L_{\text{ЧЭ2}}^{\text{э}}(y)$ при $x = \text{const}$ (рис. 2.16, б), причём диапазон изменений x составляет от -1 до $+1$ мм, а диапазон изменений y от $0,5$ до $1,5$ мм. В указанных диапазонах изменений x и y наблюдаются монотонные зависимости индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ от координат смещений x и y [22]. Чтобы убедиться в достоверности полученных результатов моделирования, были проведены экспериментальные исследования на том же датчике, что использовался в экспериментах, описание которых приведено в разделе 2.4.

Для проведения исследований применялось трехмерное градуировочное устройство, индикаторы перемещений турбинной лопатки с разрешающей способностью 10 мкм, а также измеритель RLC -параметров с цифровым отсчетом (прибор Е7-12), с помощью которого определялась эквивалентная индуктивность первичной обмотки СТ ОБТД на частоте 1 МГц ($L_1^{\text{э}*}$). Методика получения семейства ГХ $L_{11}^{\text{э}*}(x, y)$ и $L_{12}^{\text{э}*}(x, y)$ предусматривает размещение датчика в одно из двух установочных отверстий, предназначенное для ОБТД₁ с центром в точке O_1 или ОБТД₂ с центром O_2 (рис. 2.15). Градуировочное устройство обеспечивает смещение турбинной лопатки относительно ЧЭ под контролем индикаторов по каждой из трех координатных осей (X, Y, Z). При этом в процессе эксперимента фиксируется одна из координат (например x), а в диапазоне изменений другой (y) выбирается ряд значений, для каждого из которых повторяется процедура поиска минимального значения индуктивности первичной обмотки СТ ОБТД₁ по оси Z . Затем процедура повторяется для ряда значений координаты x в диапазоне ее изменений.

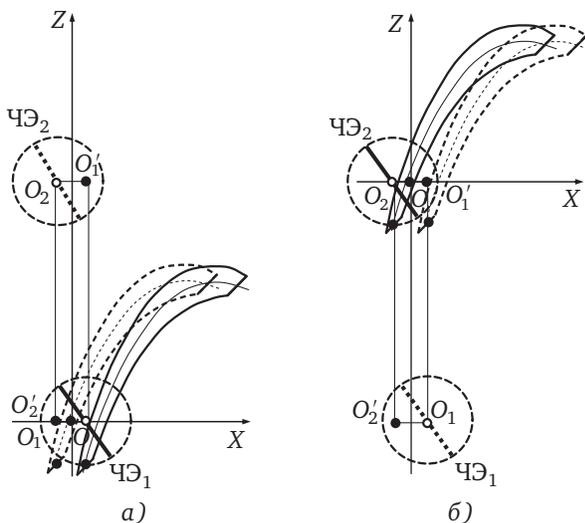


Рис. 2.15. Смещение лопатки по оси X относительно рабочих: a — ЧЭ₁; b — ЧЭ₂

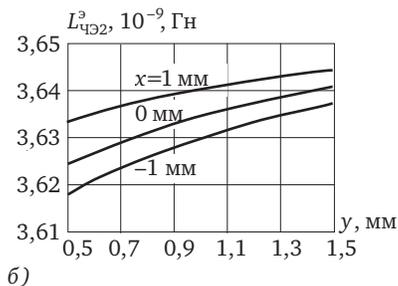
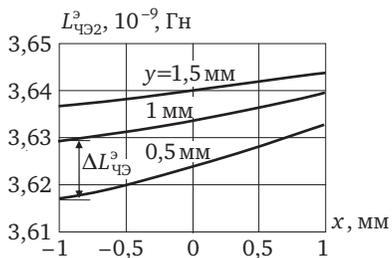
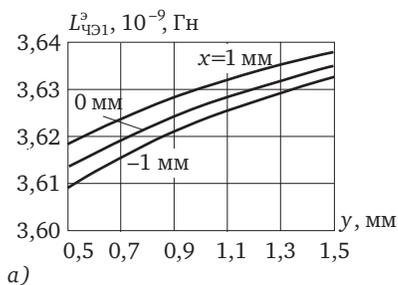
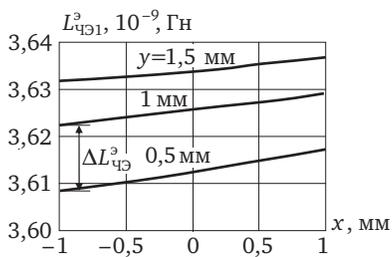


Рис. 2.16. Семейства ФП: a — ЧЭ₁; b — ЧЭ₂

В итоге формируется массив измеренных значений эквивалентных индуктивностей, которые определяют функцию $L_{11}^{\text{э}*}(x, y)$. Далее датчик переносится в установочное отверстие, предназначенное для ОВТД₂ с центром в точке O_2 , и путем аналогичных действий определяется функция $L_{12}^{\text{э}*}(x, y)$. Экспериментальные исследования семейства ГХ проводились в тех же диапазонах изменений координат x и y , а также при тех же углах разворота ЧЭ и хорды относительно оси Z , что и в процессе моделирования.

Результаты экспериментальных исследований семейства ГХ представлены на рис. 2.17.

На рис. 2.18 представлены семейства ФП в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей первичных обмоток СТ₁ и СТ₂ ($L_{11}^{\text{э}*}(x, y)$ и $L_{12}^{\text{э}*}(x, y)$), каждая точка которых вычисляется по формуле (2.28), в которой $L_{\text{чЭ}1}^{\text{э}}(t)$ и $L_{\text{чЭ}2}^{\text{э}}(t)$ определяется путем моделирования и фиксируется при $t = 0,06$ мкс (или, что равноценно, каждая точка семейства ФП $L_{\text{чЭ}}^{\text{э}}(t)$ ($L_{\text{чЭ}1}^{\text{э}}(t)$ и $L_{\text{чЭ}2}^{\text{э}}(t)$) (рис. 2.16) пересчитывается по формуле (2.28) в семейство ФП $L_1^{\text{э}}(x, y)$ ($L_{11}^{\text{э}}(x, y)$ и $L_{12}^{\text{э}}(x, y)$).

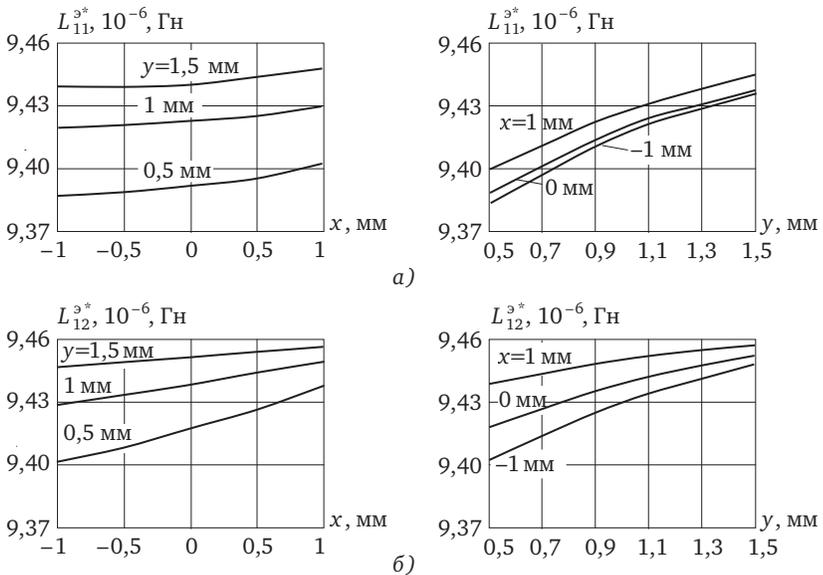


Рис. 2.17. Семейства ГХ, полученные экспериментально:
а — ОВТД₁; б — ОВТД₂

Сравнение экспериментальных и расчетных данных ФП (см. рис. 2.17 и 2.18) не только подтверждает очевидное сходство в характере изменений индуктивностей от координат x и y , но и хорошее количественное приближение каждой из представленных экспериментальных и расчетных функций при одинаковых заданных значениях координат x и y (расхождение не превышает 10%).

Аналогичное сходство наблюдается и в характере их изменений от координаты z (рис. 2.19).

Согласно *meth 2* в процессе вращения рабочего колеса (в направлении оси Z) наблюдается эффект «двоения» минимальных значений индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ (см. рис. 1.7), причем $\min_1 L_{\text{ЧЭ}1}^3$ и $\min_2 L_{\text{ЧЭ}1}^3$ соответствуют моменты времени $t_{\min1(1)}$ и $t_{\min2(1)}$, а $\min_1 L_{\text{ЧЭ}2}^3$ и $\min_2 L_{\text{ЧЭ}2}^3$ — $t_{\min1(2)}$ и $t_{\min2(2)}$. При равномерном вращении указанным значениям индуктивностей и моментам времени будут соответствовать координаты $z_{\min1(1)}$ и $z_{\min2(1)}$, а также $z_{\min1(2)}$ и $z_{\min2(2)}$. Это означает, что одним из условий реализации *meth 2* является наличие двух минимумов функций $L_{\text{ЧЭ}1}^3(z)$ и $L_{\text{ЧЭ}2}^3(z)$ при фикса-

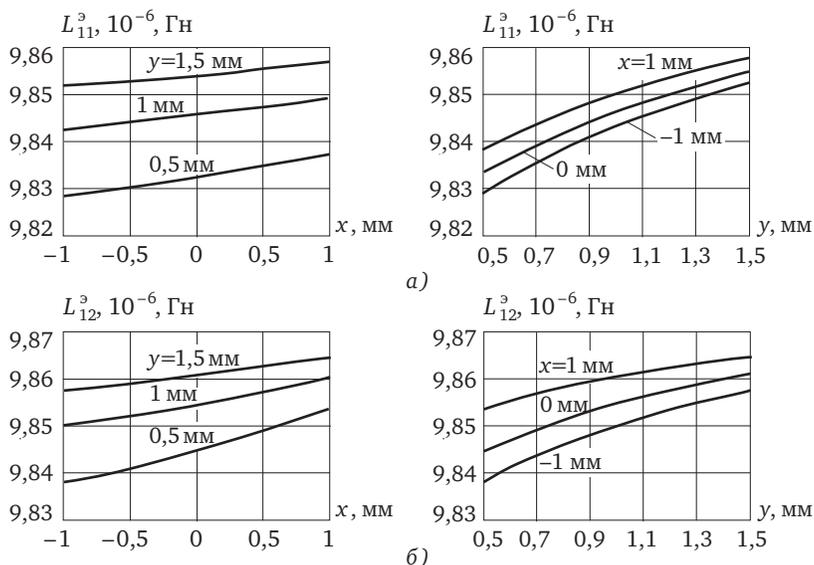


Рис. 2.18. Семейства ФП в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей первичных обмоток СТ:

a — $L_{11}^3(x,y)$; b — $L_{12}^3(x,y)$

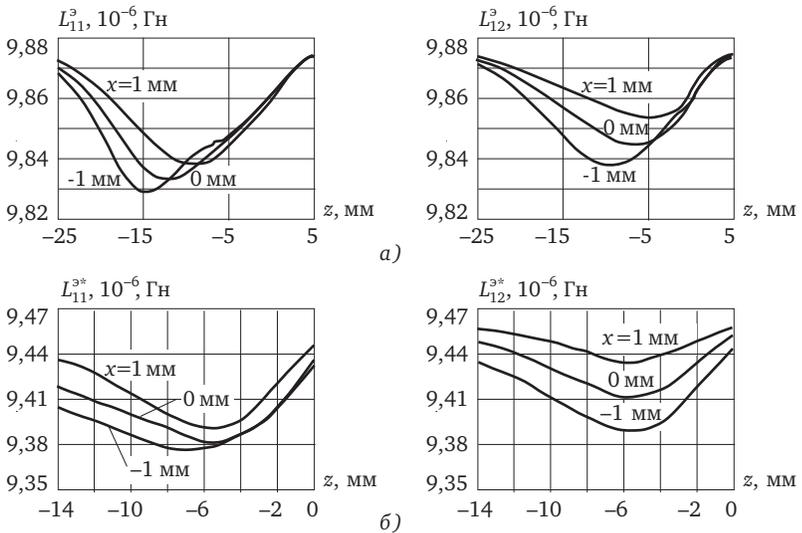


Рис. 2.19. Зависимости $L_{11}^3(z)$ и $L_{12}^3(z)$, полученные путем моделирования (а), а также $L_{11}^{3*}(z)$ и $L_{12}^{3*}(z)$, полученные экспериментально (б)

ции наименьшего из них. И последующие вычислительные эксперименты призваны подтвердить реализуемость и работоспособность *meth 2* при заданных углах разворота обоих ЧЭ на 60° от оси Z (по часовой стрелке), смещении г.ц. и в.г.ц. РК от г.ц.л. на 2 мм в сторону головной части лопатки, а также угловом положении хорды -37° от оси Z .

Рисунок 2.20 иллюстрирует получение функций $L_{\text{ЧЭ1}}^3(z)$ и $L_{\text{ЧЭ2}}^3(z)$ в предположении, что ЧЭ₁ является рабочим, а ЧЭ₂ компенсационным (рис. 2.20, а), и в предположении, что рабочим является ЧЭ₂, а компенсационным ЧЭ₁ (рис. 2.20, б). Однако в отличие от рис. 2.13 и 2.15, на которых смещения лопатки относительно системы $OXYZ$ отражают координаты центра ВК, на рис. 2.20 те же функции выполняет точка K , расположенная на поверхности спинки в месте пересечения с вертикальной прямой смещенной относительно г.ц.л. на расстояние $O_1O_2' (O_1'O_2)$ в направлении оси X .

Если координаты центров ЧЭ₁ (точка O_1) и ЧЭ₂ (точка O_2) по оси X составляют $+1$ и -1 мм соответственно, то указанное расстояние от г.ц.л. до точки K составляет 2 мм, и это означает, что в исходном

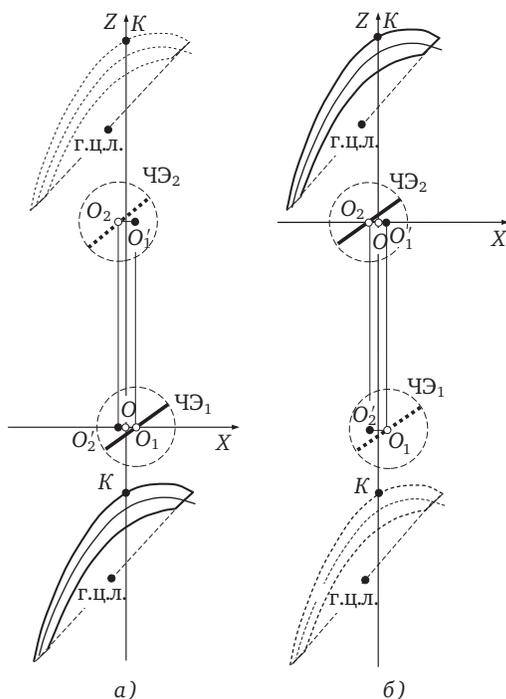


Рис. 2.20. Размещение ЧЭ в РК (*meth 2*) и смещения лопатки по оси Z относительно рабочих ЧЭ:

a — ЧЭ₁; b — ЧЭ₂

состоянии лопатки положение точки K совпадает с началом системы отсчета (точкой O). Расчет функций $L_{ЧЭ1}^3(z)$ и $L_{ЧЭ2}^3(z)$ производится для трех значений координаты x (-5 ; 0 ; $+5$ мм) при $y = 0,5$ мм (на рис. 2.20 показаны перемещения лопатки по оси Z при $x = 0$).

Результаты вычислительных экспериментов представлены на рис. 2.21.

Графики $L_{ЧЭ1}^3(z)$ и $L_{ЧЭ2}^3(z)$ на рис. 2.21 подтверждают наличие эффекта «двоения» минимальных значений индуктивностей. Кроме того, графики $L_{ЧЭ1}^3(z)$ (рис. 2.21, a) показывают наиболее заметное увеличение первого минимума индуктивностей при увеличении отрицательных осевых смещений лопатки ($x = -5$ мм) по сравнению со вторым минимумом и с теми значениями, которые наблюдаются при осевых смещениях, приближающихся к нулевым, где оба мини-

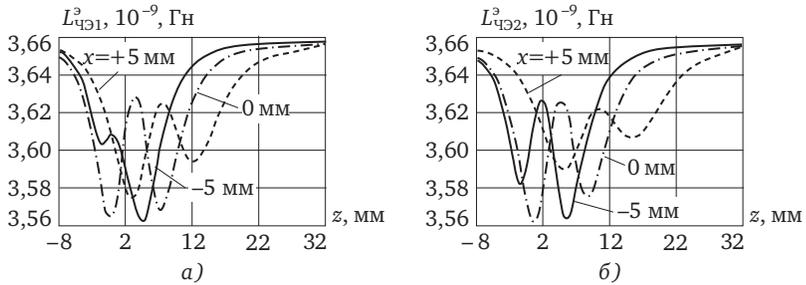


Рис. 2.21. Зависимости, полученные в результате моделирования (meth 2):
 а — $L^3_{\text{ЧЭ1}}(z)$; б — $L^3_{\text{ЧЭ2}}(z)$

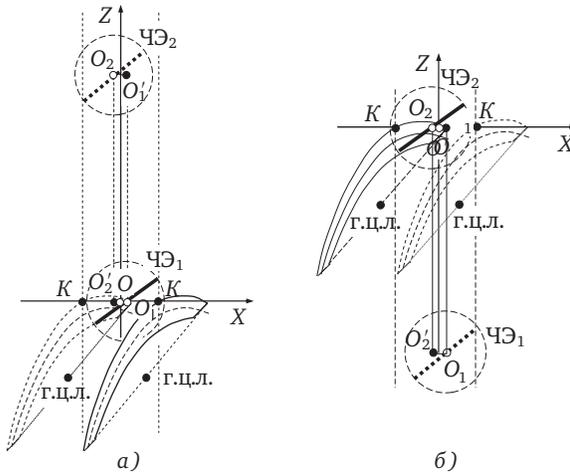


Рис. 2.22. Смещения имитатора по оси X относительно рабочих ЧЭ (meth 2):
 а — ЧЭ₁; б — ЧЭ₂

му стремятся к равенству (рис. 1.7)¹. Напротив, при увеличении осевых смещений в положительном направлении ($x = +5$ мм) увеличивается индуктивность второго минимума по сравнению с первым и с теми значениями, которые наблюдались при осевых смещениях, приближающихся к нулевым. Подобный характер изменений наблюдается и на графиках функций $L^3_{\text{ЧЭ2}}(z)$ (рис. 2.21, б).

Последующие вычислительные эксперименты связаны с получением ФП $L^3_{\text{ЧЭ1}}(x, y)$ и $L^3_{\text{ЧЭ2}}(x, y)$. Рис. 2.22 иллюстрирует осевые сме-

¹ При $x = -5$ мм происходит ЭМВ ЧЭ₁ с ВхК лопатки.

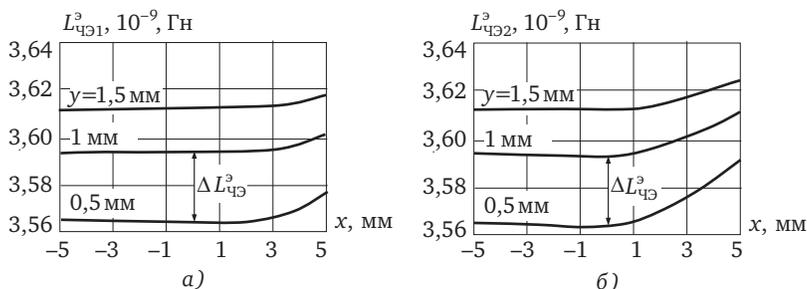


Рис. 2.23. Семейства ФП, полученные в результате моделирования (*meth 2*): а — $L^3_{ЧЭ1}(x,y)$; б — $L^3_{ЧЭ2}(x,y)$

щения лопатки (в диапазоне изменений x от -5 до $+5$ мм) при тех же положениях центров ЧЭ₁ и ЧЭ₂ (точки O_1 и O_2 с координатами $x = +1$ и $x = -1$ мм соответственно) и с теми же углами разворота (60° от оси Z по часовой стрелке), что показаны на рис. 2.20.

Результаты расчета семейства ФП представлены на рис. 2.23 в виде зависимостей $L^3_{ЧЭ1}(x)$ и $L^3_{ЧЭ2}(x)$ при $y = \text{const}$ ($y = 0,5; 1,0; 1,5$ мм). При этом на части графиков наблюдается уменьшение индуктивностей, а затем их рост при увеличении координаты x . Иначе говоря, часть графиков $L^3_{ЧЭ1}(x)$ и $L^3_{ЧЭ2}(x)$ демонстрируют неоднозначность функций, когда выбранному значению $L^3_{ЧЭ1}$ (или $L^3_{ЧЭ2}$) при заданных значениях y соответствуют два значения x .

Вместе с тем зависимости $L^3_{ЧЭ1}(y)$ и $L^3_{ЧЭ2}(y)$ при $x = \text{const}$ сохраняют характер изменений индуктивностей в сравнении с теми, что представлены на рис. 2.16, 2.18, т.е. индуктивности $L^3_{ЧЭ1}$ и $L^3_{ЧЭ2}$ монотонно возрастают с увеличением координаты y (поэтому графики $L^3_{ЧЭ1}(y)$ и $L^3_{ЧЭ2}(y)$ при $x = \text{const}$, иллюстрирующие первичное преобразование по *meth 2*, здесь не приводятся).

Характер изменений индуктивностей $L^3_{ЧЭ1}(x)$ и $L^3_{ЧЭ2}(x)$ при $y = \text{const}$ семейства ФП, полученных в результате моделирования, в целом соответствует характеру зависимостей, полученных экспериментально (для тех же исходных данных) и представленных на рис. 2.24¹. Однако экспериментальные данные демонстриру-

¹ Методика проведения экспериментальных исследований семейства ГХ (*meth 2*) аналогична методике, рассмотренной выше, при исследовании ГХ (*meth 1*). Следует также отметить, что сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными можно было бы провести после пересчета ФП на рис. 2.23 в семейства $L^3_{11}(x,y)$ и $L^3_{12}(x,y)$, чтобы сопоставить не только характер изменений, но величины эквивалентных индуктивностей (см. рис. 2.18, *meth 1*).

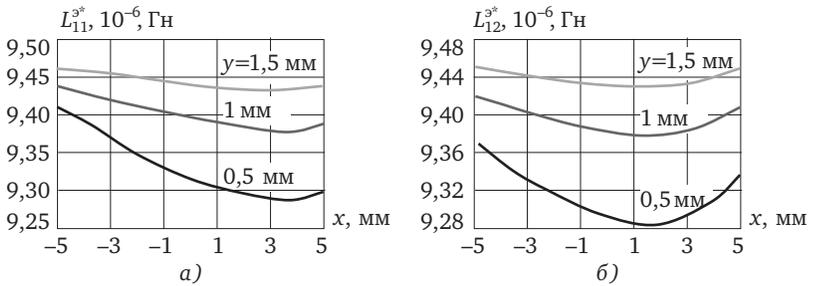


Рис. 2.24. Семейства ГХ (*meth 2*):
 а — $L_{11}^*(x,y)$; б — $L_{12}^*(x,y)$

ют более выраженные минимумы на графиках и их неоднозначность.

Следует также отметить, что семейство ГХ, представленное на рис. 2.24, построено по данным, полученным в процессе экспериментальных исследований зависимостей $L_{11}^*(z)$ и $L_{12}^*(z)$ при заданных координатах x и y (зависимости $L_{11}^*(z)$ и $L_{12}^*(z)$ изображены на рис. 2.25), которые предусматривают фиксацию минимальных значений индуктивностей из двух минимумов (в соответствии с *meth 2*).

Сравнение результатов эксперимента с результатами моделирования (см. рис. 2.21) показывает очевидное сходство в характере изменений индуктивностей, но при $x = +6$ мм в результатах эксперимента второй минимум практически неразличим.

В заключение, возвращаясь к семействам ФП, представленным на рис. 2.16 и 2.23, необходимо подчеркнуть, что они наглядно демонстрируют отличительные особенности обоих методов в отношении чувствительности к РЗ (координата y) и диапазона изменений осевых смещений (координата x).

Расчет чувствительности S производился по наибольшему изменению индуктивности $\Delta L_{чЭ}^3$ на изменение y -координаты ($\Delta y = 0,5$ мм) по формуле:

$$S = \frac{\Delta L_{чЭ}^3}{\Delta y}.$$

Тогда чувствительность, обеспечиваемая *meth 2*, более чем вдвое

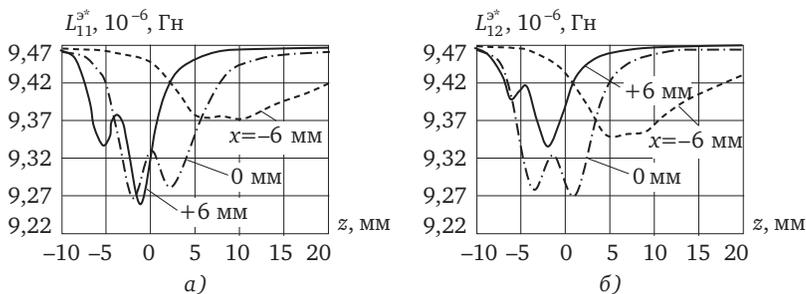


Рис. 2.25. Семейства ГХ, полученные экспериментально (*meth 2*):
 а — $L_{11}^*(x,y)$; б — $L_{12}^*(x,y)$

превышает чувствительность *meth 1*. При этом диапазон измерений *x*-координат возрастает в пять раз¹.

Заклучение к разделу 2

Разработаны модели переходных процессов в ОВТД при импульсном питании, в том числе модели передачи напряжения питания через СТ на ЧЭ и ЭМВ ЧЭ с торцевой частью турбинной лопатки.

Первая модель обеспечивает получение в аналитическом виде выражений токов в первичной обмотке СТ, в ОВ и ЧЭ, а также напряжения на ЧЭ, изменяющихся во времени в ответ на ступенчатое возмущение напряжения питания. Результаты расчета, проведенного с помощью разработанной модели применительно к СТ на высокотемпературном ферритовом сердечнике и «воздушном» СТ, показали монотонный характер нарастания тока в первичной обмотке, увеличение тока в ОВ и ЧЭ до максимума с последующим уменьшением до нуля и скачкообразное изменение напряжения на ЧЭ в момент подачи питания на первичную обмотку в обоих вариантах СТ, причем отношение этих напряжений в указанный момент времени полностью соответствует коэффициенту трансформации. Однако если в первом варианте СТ (с ферритовым сердечником) в начале переходного процесса наблюдается лишь незначительное падение напряжения на ЧЭ и его ступенчатая форма практически сохраняется, то в варианте с

¹ Однако при вычислении искомых координат смещений в системе измерения, реализующей *meth 2*, приходится использовать специально разработанные алгоритмы (см. раздел 4).

«воздушным» СТ оно уменьшается примерно вдвое.

Вторая из вновь разработанных моделей является численной, построенной на основе метода КЭ, и отличается от известных моделей объемом и формой торцевой части лопатки, которые соответствуют реально существующим в турбине. В модели предусмотрен идеализированный контур ЧЭ, на который подается ступенчатое напряжение питания. С помощью закона Био—Савара ведется расчет индукции в контуре ЧЭ, определяемой векторной суммой индукций контуров в КЭ торцевой части лопатки, зависящей от ее положения относительно системы отсчета. Найденные значения индукции позволяют вычислить потокосцепление и эквивалентную индуктивность ЧЭ.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что вихревые токи в КЭ имеют одинаковую форму изменений во времени — они возрастают от момента появления напряжения в контуре ЧЭ до максимума и уменьшаются до нуля. Токи в контурах КЭ являются причиной изменений во времени эквивалентной индуктивности ЧЭ, которая минимальна в момент появления напряжения питания и монотонно возрастает до установившегося значения по мере затухания токов в контурах.

Кроме того, приведено описание процесса трансформации эквивалентной индуктивности ЧЭ в первичную обмотку СТ. Показано, что изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки во времени в начале переходного процесса при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика незначительны, и с точностью в единицы процентов ее можно считать постоянной. Показана также простейшая связь между эквивалентными индуктивностями первичной обмотки и ЧЭ через квадрат коэффициента трансформации. При наличии лопатки в зоне чувствительности ЧЭ, когда эквивалентная индуктивность ЧЭ изменяется во времени, в начале переходного процесса простейшая ее связь с эквивалентной индуктивностью первичной обмотки СТ через квадрат коэффициента трансформации остается в силе.

Проведены экспериментальные исследования тока в первичной обмотке СТ, напряжения на ЧЭ, изменяющихся во времени, в том числе в начале переходного процесса. Исследования показали существенное расхождение с результатами расчета, что связано с упрощенной оценкой омических сопротивлений и неучтенным в модели

влиянием вихревых токов в элементах конструкции ОВТД (ОВ, ТВ и ЧЭ), а также принятым допущением о нулевом значении индуктивности ТВ.

Показано, что причиной почти трехкратного уменьшения уровня напряжения на ЧЭ в начальной области переходного процесса (по отношению к расчетному) является индуктивность ТВ, которая примерно вдвое превышает индуктивность ЧЭ. Причиной же обнаруженного плавного роста напряжения на ЧЭ во времени в пределах того же начального участка в отличие от его падения (по результатам расчета) является значительное увеличение эквивалентного сопротивления элементов конструкции — ОВ, ТВ и ЧЭ. Предложены способы оценки эквивалентных индуктивностей (с учетом индуктивности ТВ) и сопротивления первичной обмотки СТ на основе сравнения и сопоставления расчетных и экспериментальных данных, которые могут быть использованы в процессе моделирования ИЦ с импульсным питанием.

И, наконец, приведены результаты вычислительных экспериментов по определению семейств ФП РК ОВТД в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей ЧЭ от x , y -координат, которые получены на модели ЭМВ ЧЭ и торцевой части лопатки для каждого из предложенных методов измерения (*meth 1* и *meth 2*) и характеризуют этап первичного преобразования. Показано, что характер изменений индуктивностей ЧЭ в семействах ФП в целом соответствует изменениям индуктивностей первичных обмоток СТ от тех же координат в семействах ГХ, полученных экспериментально с использованием реальных турбинных лопаток. При этом *meth 2* по сравнению с *meth 1* демонстрирует повышение чувствительности к координате y (РЗ) более чем вдвое, а также расширение диапазона изменений по координате x в пять раз. Однако такое расширение сопровождается немонотонностью ФП и ГХ, что вызывает необходимость использования специальных алгоритмов последующей обработки, отличающихся от известных, которые применяются в реализациях существующих кластерных методов и которые можно использовать при реализации *meth 1*.

Исследования измерительных цепей

Из предыдущих разделов известно, что в ИЦ с ОВТД, которые предназначены для измерения координат смещения торцов лопаток, в том числе РЗ, используется метод ПП, который предусматривает подачу прямоугольного импульса питания на ИЦ с датчиком и фиксацию производной тока в момент подачи питания, т.е. в тот момент времени, когда изменения индуктивности ОВТД, связанные с координатами, имеют наибольшую величину (см. рис. 2.10).

Согласно [4] на начальных этапах реализация метода ПП осуществлялась в ИЦ в виде моста Блумлейна. В два смежных его плеча включались рабочий и компенсационный ОВТД, а в остальные плечи — две катушки с тесной магнитной связью. Это обеспечивало практически нулевое входное сопротивление для токов в датчиках при подаче в диагональ питания прямоугольного импульсного напряжения, а также получение в другой диагонали напряжения, соответствующего производной разности токов, протекающих через датчики. Производная в момент подачи питания определялась изменениями индуктивности рабочего ОВТД. Разумеется, паразитные параметры ИЦ, в частности, собственные емкости ОВТД, линии связи и катушек сдвигали фиксируемый максимум производной к моменту времени $t_m > 0$, но время t_m составляло при этом до единиц процента от постоянной времени ОВТД (а следовательно, и постоянной времени ИЦ).

Очевидный недостаток моста Блумлейна — это наличие моточных элементов — катушек, выполняющих операцию дифференцирования токов. Поэтому на фоне бурного развития электронной элементной базы (в том числе операционных усилителей (ОУ)) в последующие десятилетия практически остановились работы по совершенствованию ИЦ на основе мостов Блумлейна.

На сегодняшний день все существующие ИЦ построены на электронной элементной базе и представлены двумя разновидностями. Первая содержит неравновесный мост на входе и ОУ в режиме дифференцирования напряжения, причем как в рабочем, так и в компенсационном плечах моста последовательно с ОВТД включены резисторы, с которых снимается выходное напряжение моста для последующего дифференцирования [1, 2]. Сопротивление этих резисторов, как правило, многократно превышает омическое сопротивление и эквивалентное сопротивление первичной обмотки СТ ОВТД. Поэтому максимум производной фиксируется в момент времени (t_m), который может оказаться соизмеримым с постоянной времени, определяемой индуктивностью СТ ОВТД и указанным резистором, что в принципе противоречит основному положению метода ПП об измерении в самом начале переходного процесса.

Вторая разновидность ИЦ, которая в работе [23] получила название «электронного аналога моста Блумлейна», предполагает отсутствие таких резисторов в рабочем и компенсационном плечах моста, а вместо них включение преобразователей «ток—напряжение» (ПТН) на ОУ с резисторами в обратной связи. Особенность «электронного аналога» состоит в том, что токи в ОВТД (при аналогичном питании) и постоянные времени сохраняются примерно теми же, что и в мосте Блумлейна. Разностное напряжение с выходов ПТН либо дифференцируется с помощью ОУ, а максимум производной фиксируется в запоминающем устройстве (ЗУ), либо осуществляется операция приближенного дифференцирования — разностное напряжение (с выходов ПТН) фиксируется через короткий интервал времени, равный длительности импульса питания, и производится аналого-цифровое преобразование с предварительным усилением или без него [24, 25]. Путем моделирования исследовались процессы накопления и рассеяния энергии, оценивалось быстрое действие обеих разновидностей ИЦ с учетом динамических характеристик применяемых ОУ, параметров линий связи (ЛС) и ОВТД, предназначенных для использования в турбинах. Сравнение результатов моделирования, приведенных в [24], показало преимущества ИЦ с приближенным дифференцированием, которые оказались решающими в выборе разновидности ИЦ преобразователя (ПР) [26], предназначенного для систем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в турбине.

Вместе с тем необходимо отметить, что в выбранной разновидности ИЦ, во входную дифференциальную схему которой включены рабочий и компенсационный ОВТД, в свою очередь, возможны два варианта.

Предполагается, что в первом варианте входная часть дифференциальной схемы строго симметрична (ИЦ-С), т.е. эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ обоих ОВТД при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика, выполняющего рабочие функции, равны ($L_{11}^3 = L_{12}^3 = L_0$) [27]. Во втором варианте входная часть схемы несимметрична (ИЦ-НС). При этом эквивалентная индуктивность первичной обмотки СТ одного из датчиков, например ОВТД₂, больше, чем у ОВТД₁. Полагая, что эквивалентная индуктивность СТ₁ ОВТД₁ равна L_{11}^3 , эквивалентную индуктивность СТ₂ ОВТД₂ можно представить в виде $L_{12}^3 = L_{11}^3 + L_d = L_0 + L_d$, где L_d рассматривается как дополнительная индуктивность, обеспечивающая однополярное напряжение на выходе масштабирующего усилителя (МУс) и номинальный режим работы однополярного АЦП в составе ИЦ (при смене функции ОВТД с рабочей на компенсационную).

Следует подчеркнуть, что дополнительная индуктивность L_d как реально существующий элемент входной схемы фактически отсутствует, но индуктивность одного из ОВТД подбирается больше, чем другого¹. Отбор таких ОВТД из множества экземпляров не вызывает каких-либо трудностей даже при существующей технологии изготовления датчиков. Но разность индуктивностей, т.е. величина L_d , должна составлять около 1% от индуктивности L_0 и не может быть ниже максимально возможных изменений индуктивности первичной обмотки СТ ОВТД, связанных с искомыми изменениями радиальных и осевых смещений торцов лопаток.

Необходимо также отметить, что в варианте ИЦ-С предусмотрено применение АЦП с дифференциальными входами и быстродействием не ниже АЦП, используемого в варианте ИЦ-НС, но с большей разрядностью. При этом входы АЦП подключаются к выходам обоих ПТН и необходимость в МУс отпадает. Представляются очевидными преимущества варианта ИЦ-С по сравнению с ИЦ-НС, которые усиливаются с учетом интенсивного развития электронной элементной

¹ При этом в последующих описаниях структурной схемы ИЦ и ее модели, а также в процессе анализа представляется более удобным сохранение L_d как отдельного элемента схемы, чем ее включение в индуктивность ОВТД.

базы и, в частности, микросхем АЦП с повышенными разрядностью и быстродействием. Однако реализуемость варианта ИЦ-С в перспективе зависит от совершенствования технологии изготовления ОВТД, обеспечивающей равенство эквивалентных индуктивностей первичных обмоток СТ обоих датчиков или хотя бы отбор таких пар из множества с допустимыми незначительными отклонениями.

Приводятся сравнительные описания структурных схем и функционирования обоих вариантов ИЦ, оцениваются их достоинства и недостатки.

Кроме того, дано описание вновь разработанной модели ИЦ с приближенным дифференцированием [28], которая отличается от известных переменными во времени эквивалентными индуктивностями первичных обмоток СТ датчиков, причем исходными данными в вычислительных экспериментах являются результаты исследования ЭМВ ЧЭ с лопаткой (см. раздел 2.2 и [22]).

Следует также отметить, что попытки построения моделей ИЦ с переменными во времени индуктивностями датчиков предпринимались и ранее, но в работах [29, 30] исследовались только ИЦ первой разновидности (с неравновесными мостами и дифференцирующим усилителем), а результаты моделирования можно считать лишь предварительными и приближенными, поскольку численные расчеты велись с большим временным шагом для гипотетических исходных данных об изменении индуктивности ОВТД во времени. В работе [17], ориентированной на исследования той же разновидности ИЦ, при разработке модели автор ограничился составлением системы дифференциальных уравнений для эквивалентной схемы ИЦ с переменными во времени индуктивностями ЧЭ ОВТД, но в последующем анализе использовал упрощенную и фактически идеализированную модель с постоянными во времени параметрами.

И, наконец, в завершающей части настоящего раздела приведены результаты исследований изменяющихся во времени токов и напряжений в различных точках обоих вариантов ИЦ с приближенным дифференцированием, а также семейств ФП (зависимостей цифровых кодов от координат смещений торца лопатки) [31], полученных с помощью разработанной модели ИЦ с использованием исходных данных в виде переменных во времени эквивалентных индуктивностей ЧЭ (см. раздел 2.2). Изложению перечисленных материалов предшествует описание процедуры верификации разработанной мо-

дели ИЦ, предусматривающей проведение специально организованного эксперимента и сравнение его результатов с результатами моделирования при одинаковых исходных данных, характеристиках и параметрах элементов ИЦ [32].

3.1. Структурные схемы измерительных цепей и их функционирование

Для удобства сравнения на рис. 3.1 представлены структурные варианты ИЦ-С (а) и ИЦ-НС (б). Входная часть варианта ИЦ-С — дифференциальная схема, которая включает ЧЭ и первичные обмотки СТ обоих ОВТД (ЧЭ₁, СТ₁ в ОВТД₁ и ЧЭ₂, СТ₂ в ОВТД₂), а также два ПТН (ПТН₁ и ПТН₂). Питание датчиков в виде коротких прямоугольных импульсов (частотой до нескольких мегагерц) формируется бесконтактными ключевыми элементами (K_1, K_2) в цепи источника постоянного напряжения E . Ключевые элементы и источник шунтируют резисторы R_{p1} и R_{p2} , через которые производится рас-

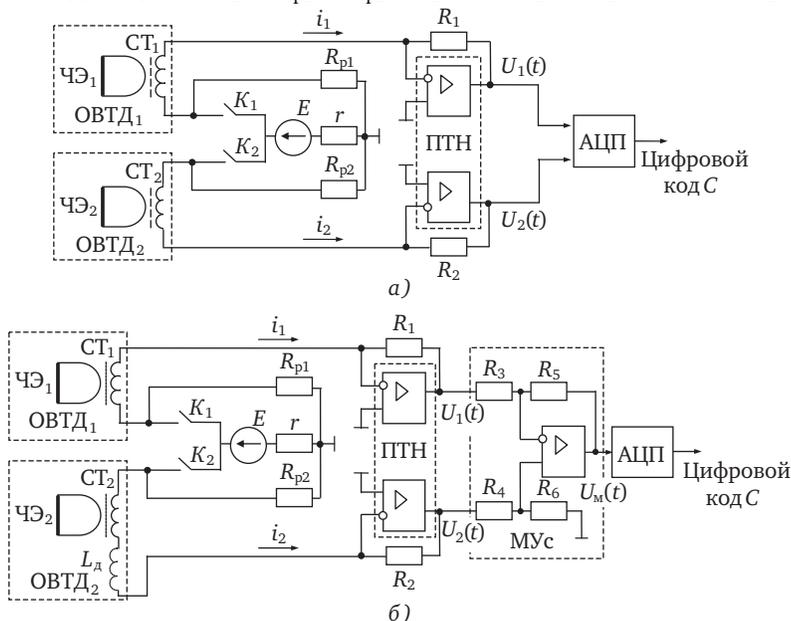


Рис. 3.1. Структурные схемы вариантов:
а — ИЦ-С; б — ИЦ-НС

сеяние энергии, накопленной во входной дифференциальной схеме за время импульса питания (при рассеянии энергии ключевые элементы K_1, K_2 разомкнуты).

Дифференциальная схема на входе варианта ИЦ-НС (рис. 3.1, б) аналогична, но, как отмечалось во вводной части настоящего раздела, эквивалентная индуктивность L_2^3 больше L_1^3 на величину L_d , а это означает, что при прочих равных параметрах остальных элементов рассматриваемая схема утрачивает симметрию, присущую схеме на рис. 3.1, а.

Во вводной части раздела также отмечалось, что в обоих вариантах ИЦ (в их входных цепях) осуществляется преобразование токов $i_1(t)$ и $i_2(t)$ в напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$ на выходах ПТН₁ и ПТН₂ (ОУ с резисторами R_1 и R_2 в цепях обратной связи соответственно, причем $R_1 = R_2$).

Возвращаясь к варианту ИЦ-С, необходимо еще раз подчеркнуть, что выходные напряжения ПТН (U_1, U_2) поступают непосредственно на дифференциальные входы АЦП и это обеспечивает получение цифрового кода на его выходе, пропорционального разности напряжений $\Delta U = U_1 - U_2$ в момент окончания импульса питания.

В варианте ИЦ-НС (рис. 3.1, б) разностное выходное напряжение ПТН усиливается в МУС, причем за счет дополнительной индуктивности L_d во входной схеме разностное напряжение $\Delta U = U_1 - U_2$, как и напряжение на выходе МУС ($U_M(t)$), не меняет полярность при смене функций ЧЭ с рабочих на компенсационные. Поэтому в варианте ИЦ-НС используется АЦП, рассчитанный на входные напряжения одной полярности.

Отсутствие МУС в варианте ИЦ-С упрощает схему, но вызывает необходимость в применении АЦП с дифференциальными входами и с более высокой разрешающей способностью¹.

Функционирование обоих вариантов ИЦ поясняют временные диаграммы, приведенные на рис. 3.2 и 3.3.

На эюре 1 (вариант ИЦ-С, рис. 3.2) изображено импульсное питание, амплитуда которого практически равна E (напряжению источника), а его частота зависит от минимально возможной длительности прохождения торцевой частью лопатки в зоне чувстви-

¹ В продукции ведущих мировых производителей АЦП наблюдается стремительный прогресс в ассортименте и в основных показателях эффективности предлагаемых пользователям микросхем. И если в варианте ИЦ-НС применяется десятиразрядный АЦП, то уже сегодня для варианта ИЦ-С можно использовать восемнадцатиразрядный АЦП с дифференциальными входами [33], причем новейшие разработки с более высокими показателями ожидаются уже в ближайшее время.

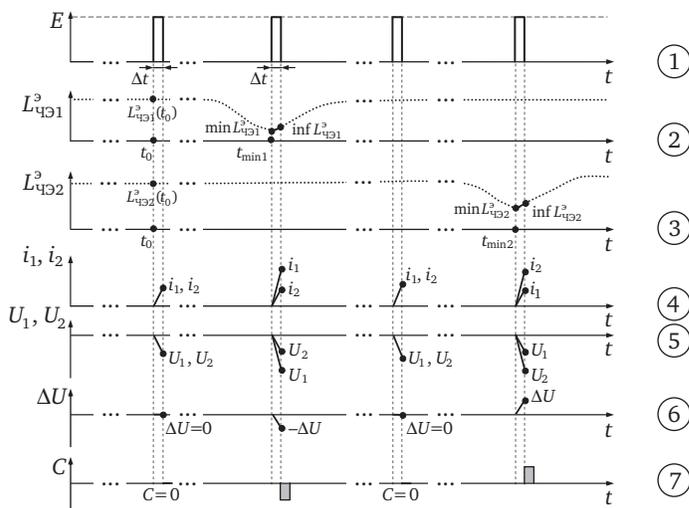


Рис. 3.2. Временные диаграммы функционирования варианта ИЦ-С

тельности датчика, которая, в свою очередь, зависит от максимально возможной линейной скорости торца лопатки, ее ширины, длины ЧЭ и определяемого ею диаметра ТВ, а также размеров соответствующей им зоны чувствительности¹.

Чтобы не загромождать временные диаграммы, интервалы времени, соответствующие прохождению торцом выбранной лопатки зоны чувствительности датчика, показаны на эпюрах 2 и 3 только для *meth 1*. В каждом из интервалов указаны минимальные значения индуктивностей ($\min L_{\text{ЧЭ}1}^3$, $\min L_{\text{ЧЭ}2}^3$), которые названы информативными. Однако преобразование $\min L_{\text{ЧЭ}1}^3$, $\min L_{\text{ЧЭ}2}^3$ в моменты времени $t_{\min 1}$, $t_{\min 2}$ возможно только в гипотетической цепи (построенной на основе метода ПП), в которой производные токов или их разности фиксируются в момент подачи напряжения (переднего фронта импульса питания).

¹ Нетрудно показать, что при частоте вращения $10\,000 \text{ мин}^{-1}$ и линейной скорости торцов лопатки около 500 м/с , длине ЧЭ и внутреннем диаметре ТВ 10 мм , длительность прохождения торцевой частью зоны чувствительности составляет $20 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Тогда при частоте импульсов 1 МГц (период 10^{-6} с) в указанном интервале окажется 20 импульсов питания. Однако на эпюре 1 рис. 3.2 и 3.3 показано только по одному импульсу питания из последовательности импульсов, как во время прохождения лопаткой ЧЭ, так и при ее отсутствии.

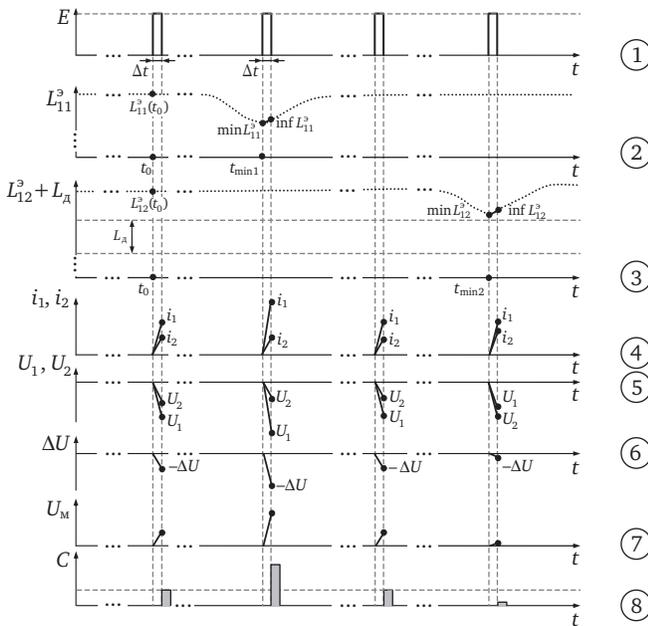


Рис. 3.3. Временные диаграммы функционирования варианта ИЦ-НС

Вместе с тем в соответствии с результатами моделирования ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки (см. раздел 2.2) в тот же момент времени индуктивность ЧЭ имеет минимальное значение, а затем с течением времени монотонно возрастает (см. рис. 2.11, в). Поэтому в варианте ИЦ-С, как и в ИЦ-НС, в которых выполняется приближенное дифференцирование, за время Δt произойдет увеличение индуктивности от $\min L_{\text{ЧЭ}1}^3$, $\min L_{\text{ЧЭ}2}^3$ до некоторых значений, соответствующих моментам окончания импульса питания. Именно эти значения следует считать информативными $[\inf L_{\text{ЧЭ}1}^3(t), \inf L_{\text{ЧЭ}2}^3(t)]$ с учетом изменений индуктивностей во времени ($L_{\text{ЧЭ}1}^3(t)$, $L_{\text{ЧЭ}2}^3(t)$) на отрезке Δt ¹.

На эпюрах 4, 5, 6 изображены изменения токов i_1 и i_2 на входе обоих ПТН и напряжений U_1 и U_2 на их выходах, а также разностное напряжение ΔU во времени.

¹ Такие же поправки следовало бы внести в изображения временных диаграмм для *meth 2* с той лишь разницей, что они касались бы минимального значения из двух минимумов.

В момент времени t_0 в ответ на передний фронт импульса питания начинается переходный процесс в ОВТД₁ и ОВТД₂. Поскольку эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ₁, СТ₂ и их сопротивления одинаковы, а постоянные времени обеих ветвей входной цепи равны, то токи i_1 и i_2 также равны и в течение малого отрезка времени Δt (длительность импульса питания) изменяются по линейному закону (эпюра 4). Таким же образом (с учетом инвертирования), оставаясь равными, изменяются во времени напряжения U_1 и U_2 (эпюра 5). Поэтому разностное напряжение на выходах ПТН $\Delta U = U_1 - U_2$ (с учетом знака $\Delta U = -U_1 - (-U_2)$) остается нулевым, как и цифровой код на выходе АЦП ($C = 0$) (эпюры 6, 7).

При этом предполагается, что по окончании импульсного питания (через время Δt от момента t_0) рассеяние энергии происходит мгновенно (эпюры 4—6). Кроме того, предполагается, что моменты времени $t_{\min 1}$, $t_{\min 2}$ совпадают с передними фронтами импульсов питания, а также соответствуют минимальным значениям индуктивностей $\min L_{\text{ЧЭ}1}^3$ и $\min L_{\text{ЧЭ}2}^3$ (эпюры 2, 3)¹.

В момент $t_{\min 1}$ индуктивность $\min L_{\text{ЧЭ}1}^3 < L_{\text{ЧЭ}1}^3(t_0)$, причем $L_{\text{ЧЭ}1}^3(t_0) = L_{\text{ЧЭ}2}^3(t_0)$, а $L_{\text{ЧЭ}2}^3$ сохраняет свое значение и в момент $t_{\min 1}$. Тогда в момент $t_{\min 1}$ постоянная времени ОВТД₁ будет меньше постоянной времени ОВТД₂ и, как следствие, функция $i_1(t)$ окажется круче, чем $i_2(t)$. Также круче будет и функция $U_1(t)$ по сравнению с $U_2(t)$ (эпюры 4, 5). А это означает, что разностное напряжение ΔU по окончании интервала времени Δt станет отрицательным ($\Delta U = -U_1 - (-U_2) = -U_1 + U_2 < 0$) (эпюра 6). Цифровой код на выходе АЦП также будет отрицательным.

В момент $t_{\min 2}$ индуктивность $\min L_{\text{ЧЭ}2}^3 < L_{\text{ЧЭ}2}^3(t_0)$, но $L_{\text{ЧЭ}1}^3(t_0) = L_{\text{ЧЭ}2}^3(t_0)$ и $L_{\text{ЧЭ}1}^3$ сохраняет свое значение в момент $t_{\min 2}$. Тогда в момент $t_{\min 2}$ постоянная времени ОВТД₂ будет меньше постоянной времени ОВТД₁, и функция $i_2(t)$ окажется круче, чем $i_1(t)$. В итоге, разностное напряжение ΔU будет положительным, равно как и цифровой код на выходе АЦП (эпюры 4—7).

Функционирование варианта ИЦ-НС иллюстрируют временные диаграммы, представленные на рис. 3.3.

¹ В реальных условиях рассеяние энергии, накопленной за время Δt , требует времени, и его оценки приводятся далее. Также возможны (и даже более вероятны) несовпадения переднего фронта импульса питания с моментами времени $t_{\min 1}$, $t_{\min 2}$, что может стать одной из причин появления погрешности. Её оценка приводится в разделе 5.

При этом эпюра 1 аналогична эпюре 1 на рис. 3.2 (вариант ИЦ-С), а эпюры 2, 3 отличаются эквивалентными индуктивностями первичных обмоток СТ₁, СТ₂ (L_{11}^3, L_{12}^3) вместо эквивалентных индуктивностей ЧЭ₁, ЧЭ₂ ($L_{ЧЭ1}^3, L_{ЧЭ2}^3$). Кроме того, величина индуктивности во входной ветви схемы с ОВТД₂ больше за счет L_d ($L_{11}^3 + L_d$)¹.

На эпюрах 4—5 изображены токи i_1 и i_2 и соответствующие им выходные напряжения ПТН U_1 и U_2 , на эпюрах 6, 7 — разностные напряжения ПТН ΔU и выходные напряжения МУС U_M , а на эпюре 8 — цифровые коды АЦП (C), соответствующие U_M .

Следует еще раз отметить, что при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчиков индуктивность L_d обеспечивает выходное напряжение МУС, примерно равное половине диапазона изменений номинального входного напряжения АЦП (например, момент времени $t_0 + \Delta t$, эпюра 7). Тогда при прохождении лопатки в зоне чувствительности ОВТД₁ напряжение на выходе МУС достигнет верхней границы диапазона входных напряжений АЦП, а в зоне чувствительности ОВТД₂, напротив, — нижней (моменты времени $t_{\min 1} + \Delta t$, $t_{\min 2} + \Delta t$, эпюра 7). Соответственно будут изменяться выходные коды C (в момент $t_0 + \Delta t$ это будет среднее значение; при $t_{\min 1} + \Delta t$ — максимальное; при $t_{\min 2} + \Delta t$ — минимальное).

3.2. Моделирование измерительных цепей

В работе [24] приведены результаты исследований одного из вариантов ИЦ с приближенным дифференцированием, выполненные на модели, в которой учитывались основные и паразитные параметры ОВТД и ЛС (индуктивности, емкости и сопротивления), статические и динамические параметры ОУ.

Было показано, что емкости короткой ЛС (10 см), хотя и усиливают колебательные процессы во входной части ИЦ, сравнительно быстро затухают к моменту фиксации входных напряжений АЦП, и их влияние можно не учитывать. Показано также, что динамические характеристики ОУ (при частоте единичного усиления 300 МГц) практически не оказывают влияния на результат преобразования (тем более это влияние пренебрежимо мало при использовании

¹ При этом в координатные оси $L_{11}^3, L_{12}^3 + L_d$ (см. рис. 3.3, эпюры 2, 3) внесены «разрывы», призванные показать соизмеримость изменений эквивалентных индуктивностей первичных обмоток СТ в зоне чувствительности с величиной дополнительной индуктивности L_d .

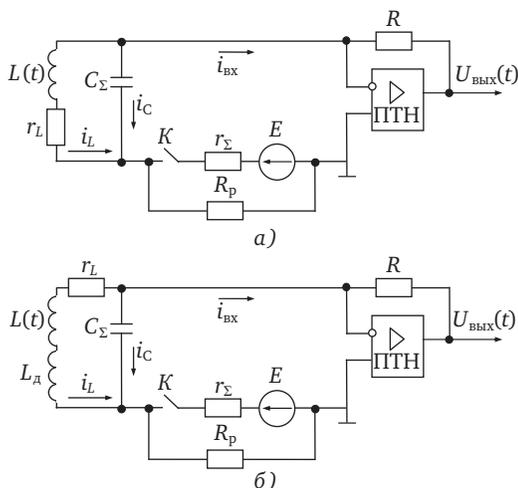


Рис. 3.4. Эквивалентные схемы вариантов ИЦ-С (а) и ИЦ-НС (на втором этапе) (б)

более высокочастотных ОУ, выпускаемых промышленностью в настоящее время [33]).

Поэтому для моделирования процессов в рассматриваемых ИЦ (см. рис. 3.1) предлагается использовать существенно упрощенные эквивалентные схемы, в которых ёмкость линии суммируется с собственной емкостью первичной обмотки СТ, а динамические характеристики ОУ идеальны и выходное напряжение ПТН определяется только входным током и сопротивлением резистора в цепи обратной связи.

Эквивалентная схема варианта ИЦ-С (см. рис. 3.1, а) изображена на рис. 3.4, а. При этом процесс моделирования (как и моделирование, выполненное в работе [24]), производится в два этапа. На первом предполагается, что в эквивалентную схему включен ОВТД₁ и ток $i_1(t)$ преобразуется в соответствующее напряжение $U_1(t)$ на выходе ПТН₁. На втором этапе в эквивалентную схему включен ОВТД₂ и ток $i_2(t)$ преобразуется в напряжение $U_2(t)$ на выходе ПТН₂. Далее вычисляется разность полученных напряжений $\Delta U(t) = U_1(t) - U_2(t)$.

Однако важная отличительная особенность эквивалентной схемы (рис. 3.4, а) состоит в том, что ОВТД₁ и ОВТД₂, выполняющие рабочие функции, представляются переменными во времени экви-

валентными индуктивностями $L_{11}^3(t)$ и $L_{12}^3(t)$, которые определяются по формуле (2.27) через эквивалентные индуктивности, полученные в результате моделирования ЭМВ ЧЭ и лопатки (см. раздел 2.2, рис. 2.10, в) с учетом индуктивности ТВ.

Возвращаясь к эквивалентной схеме на рис. 3.4, а, следует обратить внимание на обозначение параметров и их изменения в зависимости от этапа моделирования: $i_{\text{вх}}(t) = i_{1(2)}(t)$ ($i_1(t)$ или $i_2(t)$), $U_{\text{вых}}(t) = U_{1(2)}(t)$ ($U_1(t)$ или $U_2(t)$), а также $L(t) = L_{11(12)}^3(t)$ ($L_{11}^3(t)$ или $L_{12}^3(t)$ в зависимости от того, какой ОВТД выполняет рабочие функции). При этом если ОВТД₁ выполняет рабочие функции, то, как правило, L_{12}^3 предполагается постоянной величиной, соответствующей установившемуся значению $L_{\text{ЧЭ}}^3$ при $t \rightarrow \infty$ ($L_{\text{ЧЭ},\infty}^3$, см. раздел 2.2, рис. 2.10, в). Если же рабочие функции выполняет ОВТД₂, то, напротив, за постоянную и соответствующую установившемуся значению $L_{\text{ЧЭ},\infty}^3$ принимается L_{11}^3 (в обоих случаях расчет L_1^3 ведется по формуле (2.26)).

Однако возможны и исключения из «правил», когда (к примеру) рассматриваемая модель используется в исследовании влияния соседних лопаток. В этом случае вихревые токи оказывают влияние на эквивалентную индуктивность ОВТД, выполняющего компенсационные функции, и в результате эквивалентные индуктивности первичных обмоток обоих датчиков становятся функциями времени (раздел 5.1).

Токи в ветвях $i_L(t) = i_{L1(2)}(t)$, $i_C(t) = i_{C1(2)}(t)$, а в качестве сопротивлений первичных обмоток СТ₁ и СТ₂ используются эквивалентные сопротивления, найденные по формуле (2.28), т.е. $r_L = R_{1(2)}^3$. Суммарные ёмкости первичных обмоток СТ и ЛС — $C_\Sigma = C_{\Sigma 1(2)}$; суммарные сопротивления ключа в замкнутом (или разомкнутом) состоянии и внутреннего сопротивления источника E — $r_\Sigma = r_{\Sigma 1(2)}$; сопротивления рассеяния энергии $R_p = R_{p1(2)}$ и в цепях обратной связи ПТН — $R = R_{1(2)}$ (обычно в процессе моделирования значения сопротивлений и емкостей с индексами 1 и 2 предполагаются равными, но в исследованиях влияния несимметрии в ИЦ-С они могут отличаться друг от друга).

Система дифференциальных уравнений, описывающая поведение эквивалентной схемы (рис. 3.4, а) при замкнутом состоянии ключей (накопление энергии во входной части ИЦ), имеет вид:

$$\begin{cases} E = i_{\text{вх}} r_\Sigma - U_C; & i_L + i_C = i_{\text{вх}}; & U_{\text{вых}} = i_{\text{вх}} R; \\ i_L r_L + L \frac{di_L}{dt} + i_L \frac{dL}{dt} = U_C. \end{cases} \quad (3.1)$$

Поскольку сопротивление R_p почти на три порядка больше r_Σ (в замкнутом состоянии ключа), то влияние сопротивления R_p в системе уравнений (3.1) не учитывается.

Напротив, сопротивление R_p учитывается, когда ключ разомкнут и его сопротивление соизмеримо с сопротивлением изоляции. Тогда $r_\Sigma \gg R_p$, и влиянием r_Σ по сравнению с влиянием R_p можно пренебречь (величина R_p подбирается так, чтобы рассеяние энергии происходило в критическом режиме [34]). При этом систему уравнений можно записать в виде¹:

$$\begin{cases} U_C = i_{\text{вх}} R_p; & i_L + i_C = i_{\text{вх}}; & U_{\text{вых}} = i_{\text{вх}} R; \\ i_L r_L + L \frac{di_L}{dt} = U_C. \end{cases} \quad (3.2)$$

В заключение необходимо отметить, что рассмотренная эквивалентная схема (рис. 3.4, а) и соответствующие системы уравнений (3.1) и (3.2) могут быть использованы при моделировании поведения входной части ИЦ-НС, но только на его первом этапе. На втором этапе используется эквивалентная схема с дополнительной индуктивностью L_d (рис. 3.4, б), а её поведение описывают приведенные ниже системы уравнений²:

$$\begin{cases} E = i_{\text{вх}} r_\Sigma - U_C; & i_L + i_C = i_{\text{вх}}; & U_{\text{вых}} = i_{\text{вх}} R; \\ i_L r_L + (L_d + L) \frac{di_L}{dt} + i_L \frac{dL}{dt} = U_C. \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} U_C = i_{\text{вх}} R_p; & i_L + i_C = i_{\text{вх}}; & U_{\text{вых}} = i_{\text{вх}} R; \\ i_L r_L + (L_d + L) \frac{di_L}{dt} = U_C. \end{cases} \quad (3.4)$$

Причем системы дифференциальных уравнений (3.3) и (3.4) отражают процессы накопления и рассеяния энергии соответственно, а приведенные на схеме (см. рис. 3.4) параметры расшифровываются следующим образом: $i_{\text{вх}}(t) = i_2(t)$, $U_{\text{вых}}(t) = U_2(t)$, а также $i_L(t) = i_{L2}(t)$, $i_C(t) = i_{C2}(t)$, $r_L = r_{L2}$, $C_\Sigma = C_{\Sigma 2}$, $r_\Sigma = r_{\Sigma 2}$, $R_p = R_{p2}$ и $R = R_2$.

¹ В процессе рассеяния энергии эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ считаются постоянными и равными, фиксируемыми в момент окончания импульса питания.

² Строго говоря, L_d , как часть индуктивности L первичной обмотки СТ также изменяется во времени. Однако с учетом ее малой величины (менее одного процента от L) изменениями во времени L_d можно пренебречь.

Если полученное разностное напряжение на выходах ПТН умножить на коэффициент масштабирования (усиления) МУс (предположив идеальность его динамических характеристик), то можно получить выходное напряжение МУс или напряжение на входе АЦП.

И, наконец, по известным данным о номинальном входном напряжении и разрядности АЦП, т.е. о его коэффициенте передачи или чувствительности, вычисляется цифровой код C на выходе АЦП в обоих вариантах ИЦ (см. рис. 3.1).

Таким образом, несмотря на указанные различия в эквивалентных схемах (см. рис. 3.4) и в системах дифференциальных уравнений (3.1)—(3.4), можно утверждать, что для исследования процессов в обоих вариантах ИЦ (см. рис. 3.1) разработана практически универсальная модель, которая по исходным данным об индуктивностях ЧЭ для заданных радиальных и осевых смещений позволяет определить токи и напряжения как функции времени в любой точке схемы, а также выходные цифровые коды.

Кроме того, модель может быть использована для расчета статических характеристик — семейства ФП — $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$.

3.3. Верификация результатов моделирования

Процедура верификации (это отмечалось во вводной части настоящего раздела) предусматривает проведение специально организованного эксперимента и сравнение его результатов с результатами моделирования при одинаковых исходных данных, характеристиках элементов и параметрах ИЦ.

Эксперимент проводится с помощью стенда, основу которого составляют входная часть варианта ИЦ-С и дополнительное оборудование, аналогичное стенду, представленному на рис. 2.12, б. В дифференциальную схему входной части ИЦ-С (см. рис. 3.1, а) включаются два ОВТД (предназначенные для использования в турбинах), параметры которых подобраны по возможности одинаковыми. Производится балансировка дифференциальной схемы с таким расчетом, чтобы при отсутствии лопаток в зонах чувствительности обоих датчиков обеспечивалось равенство токов в первичных обмотках обоих СТ при подаче прямоугольных импульсов питания. При этом разностное напряжение на выходах ПТН должно быть равным нулю на всем протяжении переходного процесса.

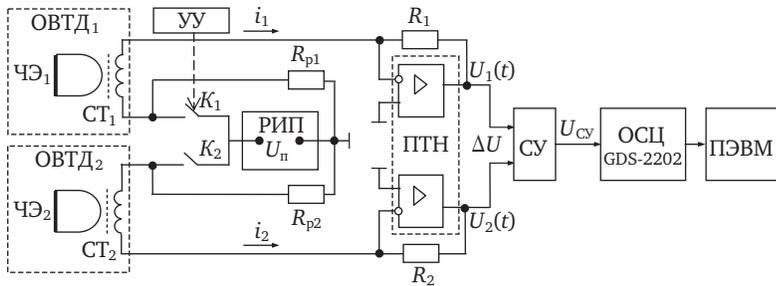


Рис. 3.5. Структурная схема стенда для экспериментальных исследований ИЦ

Если предположить, что рабочие функции выполняет ОВТД₁ (лопатка находится в зоне его чувствительности), а компенсационные ОВТД₂ (в зоне его чувствительности лопатка отсутствует), то индуктивность ЧЭ₁ уменьшается скачком с последующим монотонным ростом в соответствии с моделью ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки (см. раздел 2.2, рис. 2.10, в), и равенство токов в ветвях нарушается, а на выходах ПТН появляется разностное напряжение $\Delta U(t)$ отрицательной полярности (что и подтверждает рис. 3.2).

Однако в отличие от штатного режима работы варианта ИЦ-С, где используются кратковременные импульсы питания, ограничивающие переходный процесс его начальной областью, в экспериментах, ориентированных на верификацию модели ИЦ, предлагается расширение длительности импульсов питания, гарантирующее, по крайней мере, начало затухания вихревых токов в торцевой части лопатки. При этом напряжение $\Delta U(t)$, сохраняя отрицательную полярность с момента появления переднего фронта импульсного питания, достигает экстремального значения и вновь возвращается к нулю.

Такой эксперимент позволяет провести верификацию в наиболее полном объеме, обеспечивая сравнение полученных напряжений с результатами моделирования по трем критериям — характеру изменений функции $\Delta U(t)$, величинам экстремального значения ΔU и соответствующему ему моменту времени [32].

На рис. 3.5 представлена структурная схема стенда. Стенд содержит входную дифференциальную схему с рабочим и компенсационным ОВТД и с ПТН на выходе, а также согласующий усилитель (СУ) с дифференциальными входами и заземленным выходом, обеспечи-

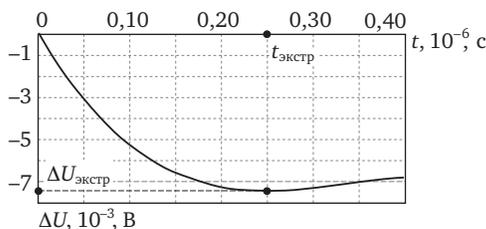


Рис. 3.6. Результаты экспериментальных исследований изменений разностного напряжения во времени $\Delta U(t)$

вающий усиление разностного напряжения ΔU с выходов ПТН без инвертирования ($U_{\text{СУ}}$).

Кроме того, в состав стенда входит устройство управления (УУ) бесконтактными ключами K_1, K_2 (FDG 6306P), регулируемый источник питания (РИП) с выходным напряжением $U_{\text{п}}$, осциллограф ОСЦ (GW Instek GDS-2202) с цифровым выходом на ПЭВМ (УУ обеспечивает увеличение длительности импульсов питания до нескольких мкс, а РИП — снижение $U_{\text{п}}$ при недопустимом увеличении токов $i_1(t)$ и $i_2(t)$, связанных с расширением импульсов питания)¹.

На рис. 3.6 представлены результаты экспериментальных исследований разностного напряжения с выходов ПТН — $\Delta U(t)$ (рабочие функции выполняет ОВТД₁, характеристики и параметры которого приведены в разделе 2).

В эксперименте использовалось градуировочное устройство (его описание также приведено в разделе 2), а размещение датчиков относительно лопатки и угол разворота ЧЭ соответствовали *meth 1*². При этом положение середины ВК лопатки относительно ЧЭ₁ ОВТД₁ и системы отсчета оставалось постоянным в течение эксперимента — $x = -1$ мм и $y = 0,5$ мм (см. рис. 2.10).

Как и ожидалось, разностное напряжение $\Delta U(t)$ имеет экстремальное значение $\Delta U_{\text{экстр}}$. Оно составляет около $-7,5 \cdot 10^{-3}$ В, и ему соответствует момент времени $0,25$ мкс ($t_{\text{экстр}}$). При этом в начале переходного процесса (до $0,06$ мкс) функция $\Delta U(t)$ практически линейна.

¹ ПТН₁ и СУ выполнены на ОУ AD8056; резисторы $R_1 = R_2 = 100$ Ом; коэффициент усиления СУ — 10.

² Выбор метода измерения для проведения экспериментов не имеет принципиального значения. Можно было бы использовать и *meth 2*, и это давало бы некоторые преимущества, связанные с более высокой чувствительностью к координате y (РЗ).

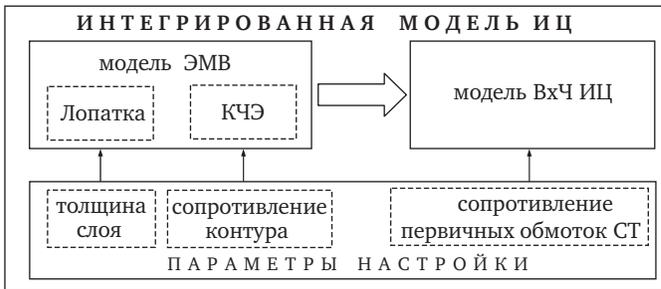


Рис. 3.7. Структурная схема модели ИЦ и параметры её настройки

Далее рассматривается серия вычислительных экспериментов на модели ИЦ, в ходе которых осуществляется настройка модели, исследуется влияние изменений параметров настройки и из полученных результатов выбираются те, при которых наблюдается наилучшее совпадение с результатами натурного эксперимента (по ранее названным критериям).

Поскольку исходными данными для моделирования ИЦ являются результаты моделирования ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки, то можно считать, что модель ЭМВ является элементом интегрированной модели ИЦ, связанным с ее входной частью (ВхЧ). В свою очередь модель ЭМВ включает модели лопатки и КЧЭ (см. раздел 2.2).

Интегрированная модель ИЦ и ее элементы изображены на рис. 3.7, где также представлены параметры настройки моделей лопатки, КЧЭ и ВхЧ ИЦ — толщина поверхностного слоя каждой из частей лопатки и соответствующих КЭ, сопротивления контура ЧЭ и первичной обмотки СТ ОБТД. Толщина слоя характеризует глубину проникновения вихревых токов в металл и зависит от электрических, магнитных характеристик металла и геометрических параметров частей лопатки и КЭ, а также от длительности импульсов питания и частоты их повторения¹.

Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что рассматриваемый параметр настройки, в конечном счете, определяет величину сопротивления в каждом из КЭ модели лопатки. Поэтому можно ут-

¹ В справочной литературе обычно приводятся данные только по частоте гармонических колебаний (например, при частоте 0,5 МГц глубина проникновения в металл лопатки составляет примерно 0,3...0,9 мм и с увеличением частоты до 5 МГц снижается до 0,1...0,3 мм) [35].

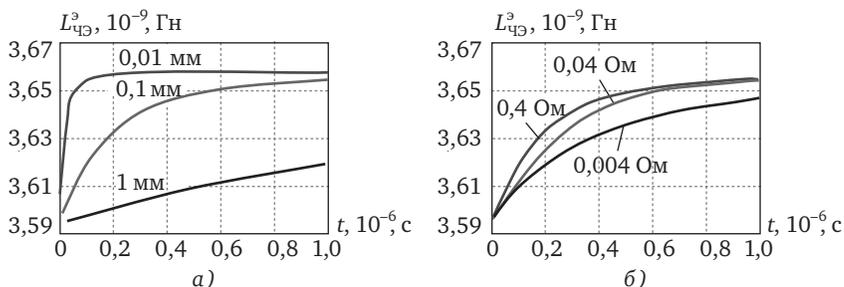


Рис. 3.8. Семейства $L_{\text{ЧЭ}}^{\text{э}}(t)$ при различных значениях толщины слоя и постоянном сопротивлении контура ЧЭ (а), а также при различных сопротивлениях контура ЧЭ и постоянной толщине слоя (б)

верждать, что все три параметра настройки модели ИЦ имеют одну и ту же физическую природу — электрического сопротивления, от величины которого зависит время затухания вихревых токов и, как следствие, скорость изменения во времени эквивалентных индуктивностей ЧЭ и первичных обмоток СТ датчиков, а потому и характер изменения разностного напряжения $\Delta U(t)$, величина его экстремального значения $\Delta U_{\text{экстр}}$ и соответствующего ему момента времени $t_{\text{экстр}}$.

Результаты вычислительных экспериментов в виде семейства эквивалентных индуктивностей $L_{\text{ЧЭ}}^{\text{э}}(t)$, полученных на модели ЭМВ при различных значениях толщины слоя (0,01; 0,1; 1,0 мм) и постоянном значении сопротивления контура ЧЭ (0,4 Ом) представлены на рис. 3.8, а. Аналогичные семейства, полученные на той же модели, но при различных сопротивлениях контура ЧЭ (0,004; 0,04; 0,4 Ом) и постоянной толщине слоя (0,1 мм) изображены на рис. 3.8, б (все остальные исходные данные для моделирования приведены в разделе 2.2, табл. 2.1).

Из графиков $L_{\text{ЧЭ}}^{\text{э}}(t)$ следует, что скорость изменения эквивалентной индуктивности ЧЭ возрастает с уменьшением толщины слоя и увеличением сопротивления контура ЧЭ и этому соответствует уменьшение времени затухания вихревых токов в лопатке и длительности переходного процесса в контуре ЧЭ.

Результаты вычислительных экспериментов в виде семейства разностных напряжений $\Delta U(t)$, полученных на модели ВхЧ ИЦ, при различных значениях сопротивления первичной обмотки СТ дат-

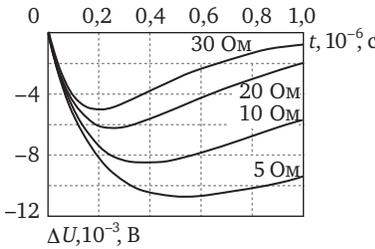


Рис. 3.9. Разностные напряжения на выходах ПТН при постоянных и заданных толщине слоя (0,1 мм) и сопротивлении контура ЧЭ (0,4 Ом)

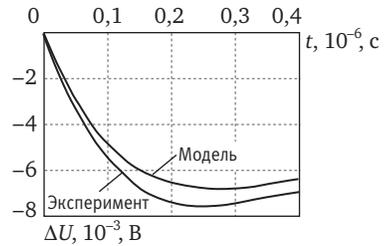


Рис. 3.10. Сравнение результатов моделирования и натурального эксперимента

чиков (5; 10; 20; 30 Ом) представлены на рис. 3.9. При этом исходными данными являются переменные во времени эквивалентные индуктивности $L_{\text{ЧЭ}}^3(t)$ (с учетом индуктивности ТВ (2.26)) при фиксированных параметрах настройки — толщине слоя (0,1 мм) и сопротивлении контура ЧЭ (0,4 Ом).

Из графиков следует, что характер изменений $\Delta U(t)$ аналогичен тому, что было получено в результате натурального эксперимента (см. рис. 3.6), а величины экстремальных значений и соответствующих им моментов времени уменьшаются с увеличением сопротивлений настройки. При этом наилучшее приближение наблюдается при значении сопротивления 20 Ом.

Целью дополнительного вычислительного эксперимента является уточнение величины этого сопротивления. Для удобства сравнения результаты моделирования и натурального эксперимента изображены на одном рис. 3.10, причем график $\Delta U(t)$, полученный на модели при сопротивлении настройки 17,5 Ом, демонстрирует минимальные расхождения по экстремальным значениям напряжения и соответствующим моментам времени (около 11%).

Следует отметить, что сопротивление настройки незначительно отличается от эквивалентного сопротивления (17,2 Ом) и активного сопротивления первичных обмоток СТ (см. раздел 2.4), что в совокупности с результатами сравнения обеих зависимостей $\Delta U(t)$ по трем вышеуказанным критериям позволяет сделать положительный вывод по итогам верификации.

Это означает также, что модель ИЦ при указанных параметрах настройки может быть использована для исследования изменений

во времени токов и напряжений в любых точках ИЦ, реализующих *meth 1* и *meth 2*, и соответствующих ФП в виде зависимостей цифровых кодов от координат x и y .

3.4. Результаты исследований измерительных цепей

Приводятся результаты исследований изменяющихся во времени токов и напряжений в различных точках обоих вариантов ИЦ, полученных с помощью универсальной модели при параметрах настройки, выбранных в процессе верификации. Та же модель использована для получения семейств ФП (зависимостей цифровых кодов от координат x и y ($C_1(x, y)$, $C_2(x, y)$) в обоих вариантах ИЦ, в которых реализованы *meth 1* и *meth 2*.

3.4.1. Изменения во времени токов и напряжений

Исследования проводятся в трех направлениях.

Первое предусматривает отсутствие лопатки в зонах чувствительности обоих датчиков. На временных диаграммах, представленных на рис. 3.2 и 3.3, это момент времени, когда эквивалентные индуктивности обоих СТ равны и определяются установившимся значением переменной во времени эквивалентной индуктивности $L_{\text{ЧЭ},\infty}^3$.

Второе направление предусматривает наличие лопатки в зонах чувствительности обоих датчиков. На тех же временных диаграммах это моменты времени, когда равенство эквивалентных индуктивностей обоих первичных обмоток нарушается и индуктивность рабочего ЧЭ изменяется во времени, а компенсационного остается без изменений.

Третье направление предусматривает исследования, в которых оценивается эффективность интегрированной модели ИЦ с переменными во времени эквивалентными индуктивностями по сравнению с известными моделями ИЦ с постоянными во времени индуктивностями.

Результаты исследования токов и напряжений при отсутствии лопатки в зонах чувствительности датчиков. Исследуются токи $i_1(t)$ и $i_2(t)$ входной части обоих вариантов ИЦ (см. рис. 3.1), напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$ на выходах ПТН₁ и ПТН₂ в ответ на прямоугольный импульс питания от источника постоянного напряжения E , а также разностное напряжение с выходов ПТН₁ и ПТН₂ — $\Delta U(t)$.

Исследования проводятся как на этапе накопления, так и на этапе рассеяния энергии. Исходными данными для моделей ИЦ являются эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ₁ и СТ₂ обоих датчиков ($L = L_{11}^3 = L_{12}^3$), которые не изменяются во времени и с учетом индуктивностей ТВ составляют $9,96 \cdot 10^{-6}$ Гн, а эквивалентное сопротивление $r_L = r_{L1} = r_{L2} = 17,2$ Ом¹. Остальные параметры эквивалентных схем: напряжение питания $E = 1,25$ В; напряжение питания ПТН и МУс — ± 5 В; суммарное сопротивление ключа в замкнутом состоянии и внутреннего сопротивления источника E $r_\Sigma = 0,5$ Ом; сопротивления для рассеяния энергии $R_p = 257$ Ом и в цепях обратной связи ПТН $R = 281$ Ом²; суммарная емкость первичных обмоток СТ и ЛС — $C_\Sigma = 10$ пФ.

Кроме того, в варианте ИЦ-НС имеется дополнительная индуктивность $L_d = 0,05$ мкГн (*meth 1*) и $L_d = 0,116$ мкГн (*meth 2*), а также МУс, коэффициент масштабирования которого равен 48,75 (*meth 1*) и 21,2 (*meth 2*). Предполагается также, что в варианте ИЦ-С используется восемнадцатиразрядный АЦП с дифференциальными входами и диапазоном изменений входного напряжения в пределах $\pm 1,0$ В (один разряд определяет полярность входного напряжения). В варианте ИЦ-НС используется десятиразрядный АЦП с однополярным входным напряжением, изменяющимся в диапазоне от 0 до $+1,0$ В³. Поскольку МУс осуществляет адаптацию номинального входного напряжения АЦП к разностному напряжению на выходах ПТН, то сопротивления на его входах и в цепи обратной связи изменяются в зависимости от реализуемого метода.

На рис. 3.11 представлены результаты моделирования вариантов ИЦ-С (а) и ИЦ-НС (б) в предположении, что длительность импульса питания $\Delta t = 0,06$ мкс.

Поскольку в любой момент времени в пределах интервала Δt

¹ Универсальная модель ИЦ рассчитана на функционирование с переменными во времени эквивалентными индуктивностями первичных обмоток, но нет никаких ограничений на использование той же модели для работы с постоянными во времени индуктивностями.

² В цепи обратной связи ПТН в составе стенда, который использовался в процессе верификации модели ИЦ, применялись резисторы с сопротивлением 100 Ом. Его увеличение обеспечивает повышение $\Delta U(t)$.

³ Элементная база варианта ИЦ-НС выбиралась в условиях жестких финансовых ограничений (ПТН и МУс выполнены на ОУ типа AD8056, а в качестве АЦП использовалась микросхема AD9200). В отличие от ИЦ-НС, вариант ИЦ-С остался нереализованным. Его исследования ограничиваются результатами, которые приводятся далее, а детальная разработка остановилась на начальном этапе.

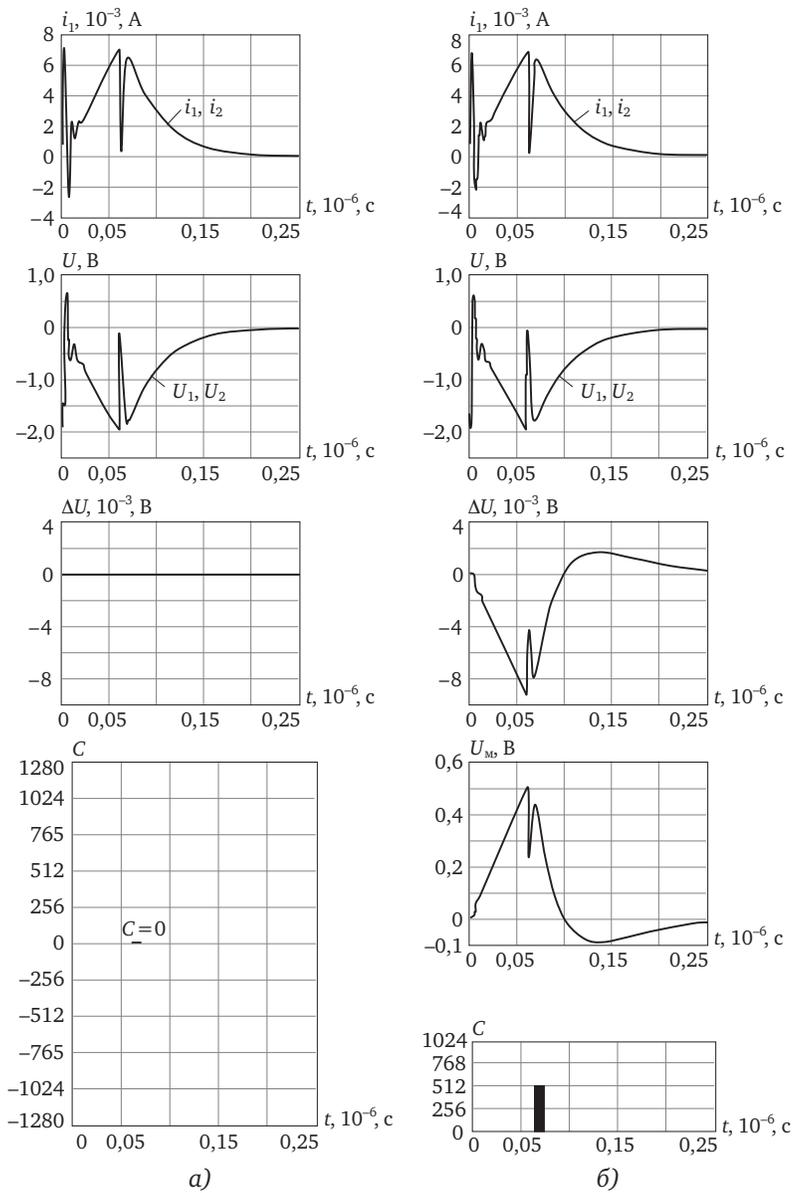


Рис. 3.11. Изменения токов, напряжений и кодов в вариантах (при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчиков): а — ИЦ-С; б — ИЦ-НС

индуктивности первичных обмоток CT_1 и CT_2 равны, то в варианте ИЦ-С соответствующие токи $i_1(t)$ и $i_2(t)$, как и напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$, также равны, а разностное напряжение $\Delta U(t)$ в тех же пределах интервала времени Δt и цифровые коды после его окончания имеют нулевое значение (что подтверждает соответствующие временные диаграммы на рис. 3.2).

Однако в варианте ИЦ-НС, за счет индуктивности L_d нарушается равенство указанных токов и напряжений¹ и, как следствие, появляется разностное напряжение $\Delta U(t)$ и напряжение на выходе МУС (U_m), а также цифровой код C (напряжение U_m должно составлять половину от номинального входного напряжения АЦП и соответствующего кода десятиразрядного АЦП).

На этапе накопления энергии (в течение $\Delta t = 0,06$ мкс) исследуемые токи и напряжения имеют практически линейный характер, длительность рассеяния энергии по токам и напряжениям (включая разностное напряжение) до уровня одного процента в обоих вариантах ИЦ не превышает 245,7 нс.

Результаты исследования токов и напряжений при наличии лопатки в зонах чувствительности датчиков. Во всех последующих вычислительных экспериментах, как и в предыдущих, исследуется поведение обоих вариантов ИЦ, но при наличии лопатки в зоне чувствительности рабочего ЧЭ. При этом в заключительной части подраздела приводятся результаты исследования влияния длины ЛС.

В исходных данных к модели ИЦ используются, как это уже отмечалось, переменная во времени эквивалентная индуктивность ЧЭ, выполняющего рабочие функции, и постоянная во времени индуктивность компенсационного ЧЭ, которая определяется установившимся значением переменной во времени эквивалентной индуктивности рабочего ЧЭ². Предполагается также, что в обоих вариантах ИЦ реализован *meth 1*, а координаты смещений неизменны — $x = -1$ мм, $y = 0,5$ мм³. Остальные параметры эквивалентной схемы аналогичны тем, что приведены в предыдущем подразделе.

¹ На рис. 3.11, б выбранные масштабы не позволяют выявить различия в парах токов ($i_1(t)$ и $i_2(t)$) и напряжений ($U_1(t)$ и $U_2(t)$).

² При этом в расчете эквивалентных индуктивностей первичных обмоток CT_1 и CT_2 , как и в предыдущем подразделе, учитываются индуктивности ТВ как удвоенные значения индуктивности ЧЭ в установившемся режиме.

³ Нет никаких ограничений для построений аналогичных эпюр токов, напряжений и кодов для *meth 2*. Характер перечисленных параметров сохраняется, изменяются только количественные показатели.

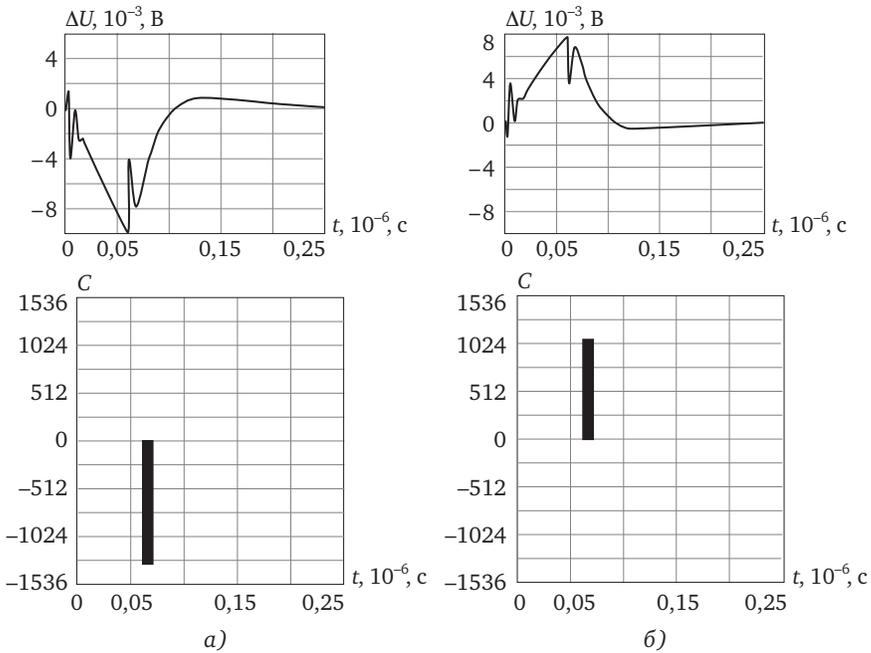


Рис. 3.12. Разностное напряжение $\Delta U(t)$ и соответствующий цифровой код (C) в варианте ИЦ-С, когда рабочие функции выполняет:
а — ЧЭ_1 ; б — ЧЭ_2

На рис. 3.12, а представлены разностные напряжения $\Delta U(t)$ для момента времени $t_{\min 1}$ (см. рис. 3.2, эпюра 2), когда лопатка находится в зоне чувствительности ЧЭ_1 , выполняющего рабочие функции (ЧЭ_2 — компенсационные), и цифровые коды C , соответствующие моменту окончания импульса питания (0,06 мкс). При смене функций ЧЭ в момент времени $t_{\min 2}$ (см. рис. 3.2, эпюра 3) изменяется полярность разностного напряжения $\Delta U(t)$ и соответствующего цифрового кода C (рис. 3.12, б), причем полярность изменений напряжений и кодов соответствует тем, что приведены на временных диаграммах рис. 3.2 (см. эпюры 6, 7).

На рис. 3.13 представлены результаты аналогичных вычислительных экспериментов на модели варианта ИЦ-НС. Они также соответствуют временным диаграммам на рис. 3.3 (эпюры 6, 7, 8). При этом в интервале времени от 0 до 0,06 мкс $\Delta U(t)$ и $U_M(t)$ не из-

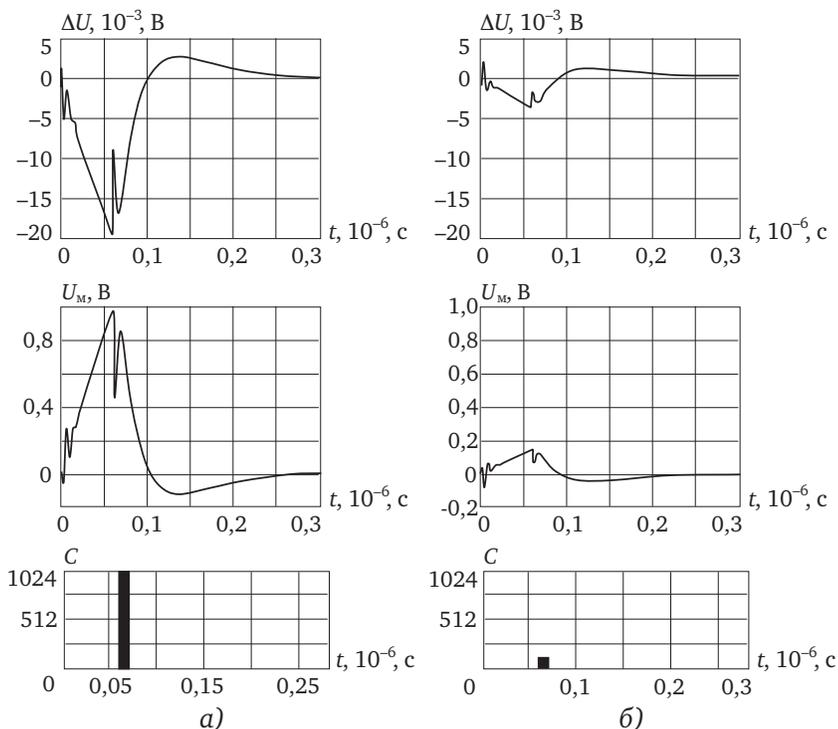


Рис. 3.13. Разностное напряжение $\Delta U(t)$ и соответствующий цифровой код (C) в варианте ИЦ-НС, когда рабочие функции выполняет:
а — ЧЭ₁; б — ЧЭ₂

меняют полярность (благодаря дополнительной индуктивности L_d), а недостаточную разрядность АЦП компенсирует МУс.

Далее рассматриваются результаты исследований влияния длины ЛС. Следует отметить, что в эквивалентных схемах обоих вариантов ИЦ влияние ЛС учитывалось ее емкостью, которая суммировалась с собственной емкостью СТ ОБТД (C_y). При этом величина емкости ЛС составляла 6,0 пФ, что соответствует ее длине порядка 15 см. Вместе с тем условия размещения преобразователя, включающего рассматриваемые варианты ИЦ, могут вызывать необходимость в увеличении длины ЛС, например, до 25 см. Представляется очевидным, что интенсивность колебательного процесса на начальном участке разностного напряжения $\Delta U(t)$ будет возрастать по сравнению с аналогичным процессом при использовании ЛС меньшей длины.

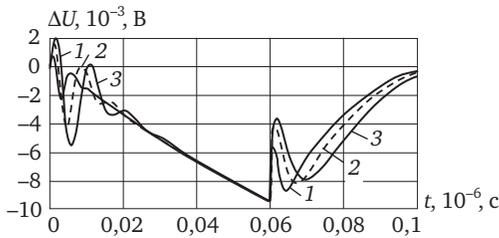


Рис. 3.14. Влияние ЛС на выходное напряжение при отсутствии ЛС (1), длине ЛС 15 см (2) и 30 см (3)

На рис. 3.14 приведены результаты вычислительных экспериментов на моделях ИЦ-С при отсутствии ЛС (1), а также при длине ЛС 15 см (2) и 30 см (3). Здесь используются те же исходные данные, что и в предыдущих экспериментах, с той лишь разницей, что рабочие функции ЧЭ₁, а компенсационные — ЧЭ₂ остаются неизменными. Из графиков $\Delta U(t)$ видно, что амплитудные значения колебательного процесса (3) превышают те же параметры в процессах (1) и (2).

Эффективность моделей измерительных цепей с переменными во времени эквивалентными индуктивностями датчиков. Эффективность моделей ИЦ оценивается количественно сравнением разностных напряжений на выходах ПТН в выбранном варианте ИЦ, реализующем один из двух методов (*meth 1* или *meth 2*). Предполагается проведение вычислительных экспериментов при заданных переменной во времени эквивалентной индуктивности ЧЭ₁, выполняющего рабочие функции, и постоянной во времени индуктивности ЧЭ₂, выполняющего компенсационные функции.

Последующие вычислительные эксперименты проводятся на модели варианта ИЦ-С, реализующего *meth 1* (эквивалентная схема на рис. 3.4, а).

Исходными данными для эквивалентной индуктивности ЧЭ₁ являются результаты моделирования ЭМВ ЧЭ₁ с лопаткой, аналогичные тем, что использовались ранее (при $x = -1,0$; $y = 0,5$ мм).

Постоянная во времени индуктивность ЧЭ₂ выбирается равной установившемуся значению индуктивности ЧЭ₁.

На рис. 3.15 представлены графики изменений во времени (в интервале от 0 до 1,0 мкс) разностного напряжения на выходах ПТН, полученного при переменной во времени индуктивности $L_{\text{ЧЭ}1}^3$ и соответственно L_{11}^3 (ΔU_{var}), а также при ее постоянных значениях, рав-

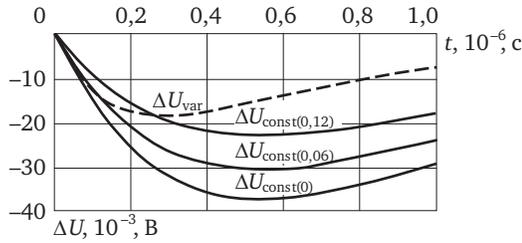


Рис. 3.15. Разностные напряжения на выходах ПТН при переменной и постоянной во времени эквивалентной индуктивности ЧЭ, выполняющего рабочие функции в ИЦ-С (*meth 1*)

ных $L_{\text{ЧЭ1}}^3$ (L_{11}^3) в момент времени $t=0$ ($\Delta U_{\text{const}(0)}$). Кроме того, в моменты времени $t=0,06$ мкс ($\Delta U_{\text{const}(0,06)}$) и $t=0,12$ мкс ($\Delta U_{\text{const}(0,12)}$).

Искомая эффективность оценивается с помощью выражения

$$\delta_{p(t)} = \left(1 - \frac{\Delta U_{\text{const}(t)}}{\Delta U_{\text{var}}} \right) \cdot 100\%,$$

где $\Delta U_{\text{const}(t)}$ и ΔU_{var} определяется в момент окончания импульса питания ИЦ ($t = \Delta t$), при этом $\Delta U_{\text{const}(t)}$ и, соответственно, $\delta_{p(t)}$ вычисляются при постоянной во времени индуктивности, соответствующей как моменту подачи импульса питания ($\Delta U_{\text{const}(0)}$ и $\delta_{p(0)}$), так и моменту его окончания ($\Delta U_{\text{const}(\Delta t)}$ и $\delta_{p(\Delta t)}$).

При длительности импульса питания $\Delta t = 0,06$ мкс в момент его окончания $\Delta U_{\text{var}} = -9,93 \cdot 10^{-3}$ В, $\Delta U_{\text{const}(0)} = -11,38 \cdot 10^{-3}$ В, а $\Delta U_{\text{const}(0,06)} = -8,97 \cdot 10^{-3}$ В. Тогда $\delta_{p(0)} = -12,8\%$, а $\delta_{p(0,06)} = 10,7\%$. При длительности импульса питания Δt , равной 0,12 мкс, $\delta_{p(0)} = -22\%$, $\delta_{p(0,12)} = 32\%$. Полученные результаты наглядно демонстрируют потерю эффективности в расчетах $\Delta U(t)$ при замене переменной во времени эквивалентной индуктивности в модели ИЦ на постоянные значения, возрастающую с увеличением длительности импульса питания.

3.4.2. Семейства функций преобразования

Искомые семейства ФП — это зависимости цифровых кодов от координат смещений торцов лопаток ($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$). Расчет ФП осуществляется с помощью универсальной модели ИЦ (раздел 3.2), причем исходными данными в таких расчетах являются переменные во времени эквивалентные индуктивности ЧЭ, трансформи-

рованные в первичные обмотки СТ. Вместе с тем исходные данные отражают результаты первичного преобразования, которое, в свою очередь, характеризует семейство ФП в виде зависимостей информативных значений эквивалентных индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂, фиксируемых в момент окончания импульса питания ИЦ, от координат смещений — $L_{\text{ЧЭ}1}^3(x,y)$ и $L_{\text{ЧЭ}2}^3(x,y)$. Технология их получения во всех подробностях рассматривается в разделе 2.4 (там же приведены и результаты вычислительных экспериментов). Фактически та же технология использовалась в исследованиях, проводимых в предыдущем разделе 3.4.1, когда для точки с заданными координатами x, y определялись переменные во времени индуктивности ЧЭ, соответствующие им эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ, а затем и соответствующие токи, напряжения в ИЦ, а также цифровые коды. Многократное повторение этой процедуры для различных парных комбинаций значений координат x и y (в диапазонах их изменений) позволяет сформировать массивы цифровых кодов и семейства ФП для обоих вариантов ИЦ.

Полученные результаты далее рассматриваются последовательно как для ИЦ, реализующих *meth 1*, так и *meth 2*.

Согласно *meth 1* в обоих вариантах ИЦ значения кода фиксируются в момент окончания импульса питания, т.е. в моменты времени $t_{\text{min}1} + \Delta t$ и $t_{\text{min}2} + \Delta t$, которым соответствуют информативные значения индуктивностей $\inf L_{\text{ЧЭ}1}^3$, $\inf L_{\text{ЧЭ}2}^3$ (см. рис. 3.2). Поэтому можно считать, что искомым семействам ФП ИЦ $\mathbf{C}_1(x, y)$ и $\mathbf{C}_2(x, y)$ полностью соответствуют полученные ранее семейства $L_{\text{ЧЭ}1}^3(x,y)$ и $L_{\text{ЧЭ}2}^3(x,y)$ (см. рис. 2.16). На рис. 3.16 представлены результаты моделирования варианта ИЦ-С, а на рис. 3.17 — ИЦ-НС.

Как и ожидалось, в обоих вариантах ИЦ сохраняется монотонность зависимостей кодов \mathbf{C}_1 и \mathbf{C}_2 от координат смещений, но в варианте ИЦ-С (в отличие от ИЦ-НС) коды \mathbf{C}_1 и \mathbf{C}_2 разнополярны, а на характер изменений тех же зависимостей в варианте ИЦ-НС влияет инвертирование разностного напряжения с выходов ПТН в МУС.

Вместе с тем представленные ФП по определению являются независимыми уравнениями двух переменных (x и y), образующих систему уравнений, а независимость уравнений гарантирует её решение и, как следствие, реализуемость *meth 1*.

В заключение рассматриваются семейства ФП обоих вариантов ИЦ, реализующих *meth 2*. Необходимо еще раз подчеркнуть, что ис-

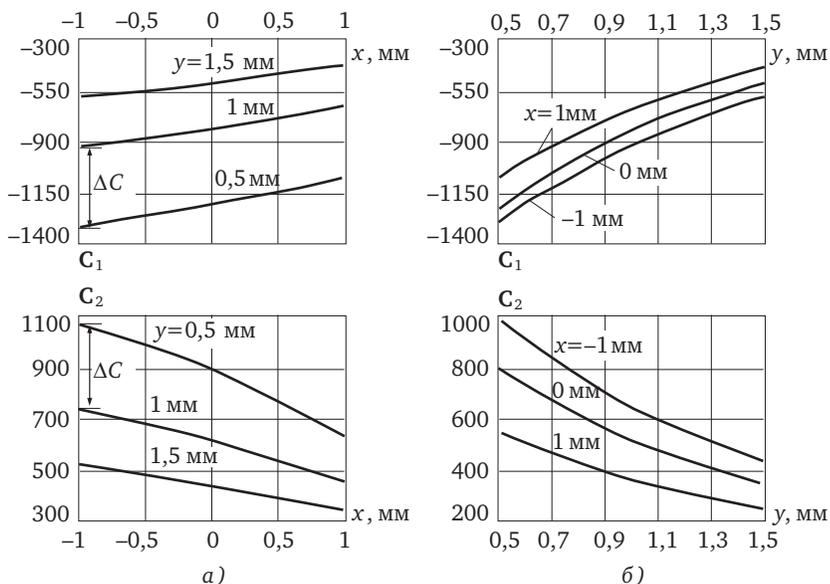


Рис. 3.16. Семейства ФП варианта ИЦ-С (*meth 1*)

ходными данными универсальной модели ИЦ являются переменные во времени эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ, связанные с соответствующими эквивалентными индуктивностями ЧЭ. При этом результаты расчета кода фиксируются в момент окончания импульса питания, т.е. через интервал времени Δt после момента времени, соответствующего минимальному значению одного из двух минимумов индуктивностей каждого ЧЭ. Полученные таким образом семейства ФП ИЦ адекватны результатам моделирования процесса первичного преобразования и ФП вида $L_{ЧЭ1}^3(x, y)$ и $L_{ЧЭ2}^3(x, y)$ (см. рис. 2.23).

На рис. 3.18 представлены семейства ФП варианта ИЦ-С, а на рис. 3.19 — ИЦ-НС, полученные в результате моделирования, в виде зависимостей $C_1(x)$ и $C_2(x)$ при $y = \text{const}$.

Из графиков ФП обоих вариантов следует, что характер изменения кодов соответствует изменениям индуктивностей ЧЭ, но имеет особенности, связанные с различиями в обоих вариантах ИЦ, оказывающих аналогичное влияние, как при реализации *meth 1*, так и *meth 2*. Однако характер изменения кодов от координаты x корен-

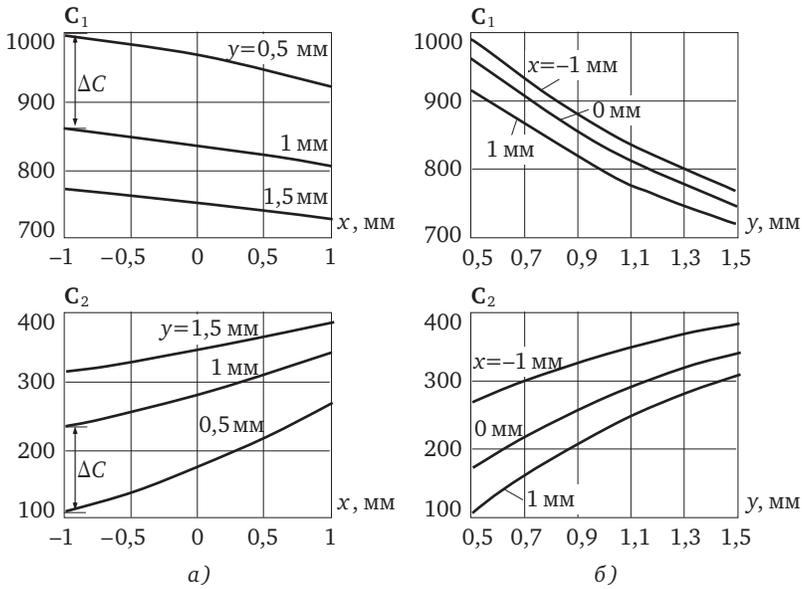


Рис. 3.17. Семейства ФП варианта ИЦ-НС (*meth 1*)

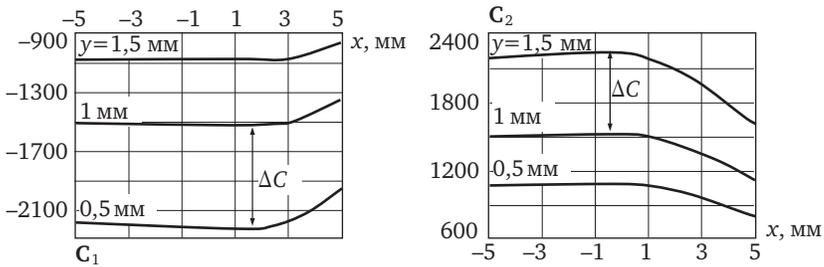


Рис. 3.18. Семейства ФП варианта ИЦ-С (*meth 2*)

ным образом отличается от соответствующих графиков ФП ИЦ, реализующих *meth 1* (см. рис. 3.16, 3.17), отсутствием монотонности. Поэтому для решения системы уравнений, составленной на основе ФП $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$, нельзя использовать метод Ньютона [2, 7], который, как правило, применяется в алгоритмическом и программном обеспечении систем измерения координат смещений торцов лопаток [1, 2], реализующих известные кластерные методы.

Решение системы уравнений, составленной на основе немонотонных ФП, возможно при использовании алгоритма, описание которого приведено в работах [11, 12] и разделе 4.4. В этом случае можно утверждать, что ИЦ, реализующие *meth 2*, в обоих вариантах обеспечивают расширение диапазона измерения осевых смещений (координаты x), соответствующее тому, что было показано в разделе 2.4. Однако повышение чувствительности, выявленное там же, подтверждается только в варианте ИЦ-С.

Действительно, чувствительность к изменениям кодов на выходе ИЦ (S_C) может быть рассчитана по формуле

$$S_C = \frac{\Delta C}{\Delta y},$$

где ΔC — наибольшие изменения кодов (см. рис. 3.16 и 3.18) и Δy — изменение координаты y , демонстрирует увеличение S_C при реализации *meth 2* более чем вдвое по сравнению с *meth 1*.

Такого повышения не наблюдается при реализации *meth 2* в ИЦ-НС (см. рис. 3.19), поскольку в процессе моделирования был выбран вдвое меньший коэффициент масштабирования МУС по сравнению с тем, который использовался при моделировании ИЦ-НС, реализующей *meth 1* (см. рис. 3.17).

Вместе с тем эффективность *meth 2* (повышение чувствительности S_C) можно показать и в аналогичных вычислительных экспериментах на ИЦ-НС, реализующей *meth 1*, но при этом коэффициент масштабирования должен быть примерно вдвое меньше того значения, при котором рассчитывались ФП, приведенные на рис. 3.19.

Полученное таким образом семейство ФП варианта ИЦ-НС для *meth 1* представлено на рис. 3.20. Из сравнения графиков на рис. 3.20 и 3.19 следует, что ΔC , а следовательно, и чувствительность S_C к РЗ (*meth 2*) более чем вдвое превышает тот же параметр (S_C), обеспечиваемый *meth 1*.

И, наконец, возвращаясь к варианту ИЦ-С и констатируя его очевидные преимущества по сравнению с вариантом ИЦ-НС, необходимо еще раз обозначить существующие на сегодняшний день трудности его реализации. Они связаны с обязательным условием полной идентичности параметров обеих ветвей дифференциальной

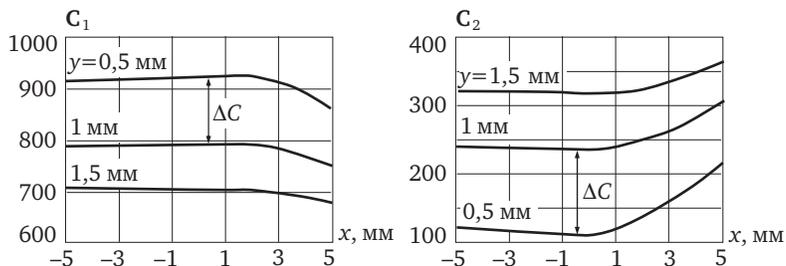


Рис. 3.19. Семейства ФП варианта ИЦ-НС (*meth 2*)

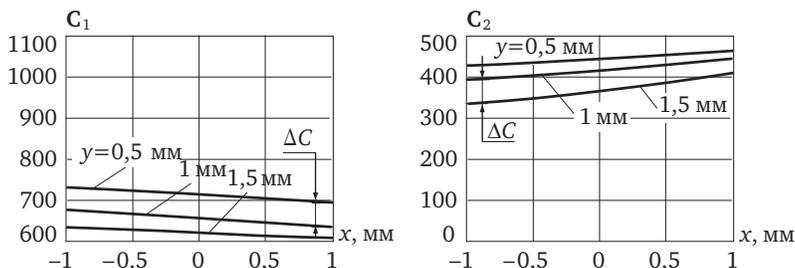


Рис. 3.20. Семейства ФП варианта ИЦ-НС (*meth 1*) при уменьшенном коэффициенте масштабирования

схемы на входе ИЦ-С. Соблюдения этого условия можно добиться, совершенствуя технологию изготовления датчиков с минимальным разбросом LRC -параметров первичных обмоток СТ либо разработкой специальных юстировочных индуктивностей с регулируемыми параметрами (не только L , но и R , C), включаемых в дифференциальную схему датчиками.

Реализация перечисленных мероприятий требует времени и дополнительных затрат. Поэтому во всех последующих разделах, посвященных системам измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, предполагается использование варианта ИЦ-НС, допускающего сравнительно большой разброс параметров, а также возможность выбора пары датчиков из множества экземпляров.

Заклучение к разделу 3

Разработаны два варианта ИЦ: в первом входная часть дифференциальной схемы, включающей ОВТД РК, симметрична (ИЦ-С),

т.е. основные параметры каждой из двух ветвей схемы с датчиками в идеале одинаковы; во втором варианте входная часть несимметрична (ИЦ-НС) и дополнительная индуктивность одной из ветвей схемы обеспечивает однополярное напряжение на выходе МУС после усиления разностного напряжения с выходов обоих ПТН, а также номинальный режим работы однополярного АЦП. В отличие от второго в первом варианте предполагается применение АЦП с дифференциальными входами и большей разрядностью. Его входы непосредственно подключаются к выходам ПТН и необходимость в дополнительном усилении отпадает. Кроме того, ожидаемое достоинство варианта ИЦ-С — повышение точности, которое обеспечивает симметрия входной части дифференциальной схемы.

С использованием временных диаграмм дано детальное описание функционирования вариантов ИЦ-С и ИЦ-НС. Показано, что в пределах коротких импульсов питания токи и напряжения в различных точках схемы имеют пилообразный характер. При отсутствии лопатки в зонах чувствительности обоих датчиков в варианте ИЦ-С напряжение на входе АЦП имеет нулевое значение, а в варианте ИЦ-НС — половину от номинального значения. С появлением лопатки в зоне чувствительности датчика, выполняющего рабочие функции, оно возрастает со знаком плюс или минус, как и цифровые коды на выходе АЦП в варианте ИЦ-С, а в варианте ИЦ-НС входное напряжение АЦП либо возрастает до максимума, либо уменьшается до нуля, равно как и цифровые коды АЦП.

Разработана универсальная модель, которая обеспечивает исследования обоих вариантов ИЦ с приближенным дифференцированием. В отличие от известных в разработанной модели первичные обмотки СТ датчиков, выполняющих рабочие функции, представлены переменными во времени эквивалентными индуктивностями, которые, в свою очередь, определяются ЭМВ ЧЭ и лопатки с учетом ее объема и формы.

Предложена процедура верификации разработанной модели ИЦ, предусматривающая проведение специально организованного эксперимента и сравнение его результатов с результатами моделирования при одинаковых исходных данных, характеристиках и параметрах элементов ИЦ. При этом сравнение осуществляется по разностному напряжению с выходов ПТН при расширенной длительности импульса питания и фиксированном положении лопатки

относительно системы отсчета. Предполагается также, что в модель ИЦ включена модель ЭМВ ЧЭ и лопатки, а согласованными изменениями параметров настройки такой объединенной модели добиваются минимального расхождения в результатах вычислительного и натурального экспериментов.

Это расхождение оценивается по трем критериям — характеру изменения разностных напряжений во времени, по величинам экстремальных значений напряжений и времени их появления. Количественно определены параметры настройки, при которых наблюдается идентичный характер изменений разностных напряжений, а расхождение в экстремальных значениях и времени их достижения не превышает 11%. Найденные значения параметров настройки фиксируются и остаются без изменений в ходе последующих вычислительных экспериментов по исследованию ИЦ.

Проведены вычислительные эксперименты, в которых исследовались изменения токов и напряжений во времени в различных точках ИЦ, цифровые коды при отсутствии и наличии лопатки в зонах чувствительности датчиков, а также при изменении длины ЛС. Показана идентичность изменений токов и напряжений во времени с ожидаемыми на временных диаграммах. Кроме того, показано, что интенсивность колебательных процессов в разностном напряжении на выходах ПТН возрастает с увеличением длины ЛС.

Исследована эффективность использования в модели ИЦ переменной во времени эквивалентной индуктивности ЧЭ. Показано, что при ее замене постоянными значениями, выбранными в моменты подачи или окончания импульса питания, погрешности в расчетах разностного напряжения составляют примерно 10% при длительности импульса питания 60 нс, и возрастают до 50% при увеличении длительности импульса питания до 240 нс.

С помощью разработанной модели ИЦ получены семейства ФП в виде зависимостей цифровых кодов от координат x , y ($C_1(x, y)$, $C_2(x, y)$) для обоих вариантов ИЦ, в которых реализованы *meth 1* и *meth 2*. Характер изменений кодов соответствует изменениям эквивалентных индуктивностей ЧЭ и первичных обмоток СТ, найденных расчетным путем, и зависимостям индуктивностей первичных обмоток СТ датчиков, полученным экспериментально, от тех же координат (x и y).

Принципы построения системы, реализующей кластерные методы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в турбине

Рассматриваются принципы построения систем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, реализующих *meth 1* и *meth 2*. Приводится описание обобщенной структурно-функциональной схемы, которое далее детализируется алгоритмами предварительной обработки, поиска и вычисления экстремальных значений кодов, а также искомым координат.

4.1. Обобщенная структурно-функциональная схема системы

Обобщенная структурно-функциональная схема представлена на рис. 4.1.

Новые разновидности методов измерения x, y -координат смещений торцов лопаток (раздел 1) предусматривают применение РК из двух ОВТД. Изменения индуктивностей датчиков, соответствующих искомым координатам смещений, преобразуются в линейно нарастающие напряжения, амплитудные значения которых соответствуют приближенным значениям первой производной токов ИЦ при

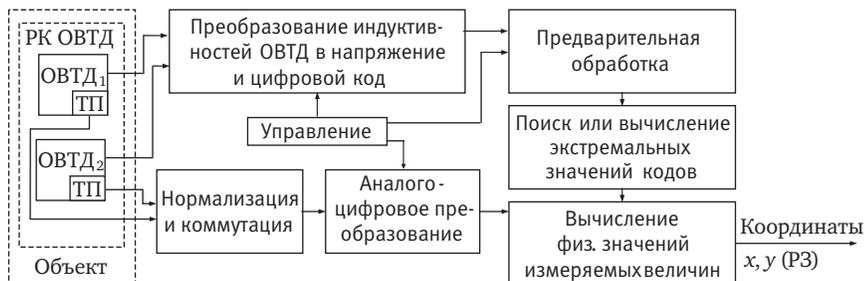


Рис. 4.1. Обобщенная структурно-функциональная схема системы

импульсном питании заданной длительности, а затем осуществляется аналого-цифровое преобразование амплитудных значений. Полученные коды подвергаются предварительной цифровой обработке и определяются экстремальные значения кодов, соответствующих моментам прохождения торцами контролируемых лопаток ЧЭ рабочих ОВТД. Найденные значения кодов C_1 , C_2 и ГХ ($C_1(x, y)$, $C_2(x, y)$) обеспечивают вычисление искомым координат.

Термокоррекция результатов преобразования ОВТД [1] производится в ходе вычислений физических значений координат x , y . Для этих целей используются встроенные в ОВТД ТП, ЭДС которых нормализуются, коммутируются, а затем производится их аналого-цифровое преобразование и вычисление физических значений температур.

Таким образом, в соответствии с обобщенной структурно-функциональной схемой (см. рис. 4.1) необходимо выполнение следующих операций: преобразование в код индуктивностей датчиков (ОВТД₁, ОВТД₂) и сигналов ТП, предварительная обработка полученных значений кодов, поиск экстремальных значений кодов C_1 , C_2 , соответствующих моментам прохождения торцами контролируемых лопаток, ЧЭ датчиков и вычисление физических значений координат x, y смещений торцов лопаток.

Выполнение перечисленных операций производится в соответствии с алгоритмом управления последовательно (во времени) в старт-стопном режиме. Благодаря предлагаемым методам (раздел 1), в отличие от существующих кластерных методов [2], отпадает необходимость в синхронизации с вращением рабочего колеса. При этом распознавание лопаток осуществляется на верхнем уровне (в ПЭВМ) в ходе обработки полученного массива данных. Операции сбора, преобразования и вычисления координат не привязаны к периоду вращения и выполняются последовательно по мере готовности исходных данных.

Опрос датчиков, включенных в ИЦ, начинается по команде от ПЭВМ (формируется импульс «Старт» на выходе виртуального COM-порта ПЭВМ). После запуска производится сбор данных и их предварительная обработка [36], включающая отбраковку и сжатие входных данных с фиксацией лишь частей массива, содержащих полезную информацию с датчиков (см. раздел 4.2). Полученный в результате «разреженный» массив кодов затем передается в ПЭВМ. Далее опера-

шивается канал измерения температуры и производится расчет её физических значений, необходимых для процедуры термокоррекции.

На следующем этапе проводится обработка полученных массивов данных в целях последующей аппроксимации и нахождения экстремумов. В упакованном массиве кодов выделяются участки, соответствующие прохождению лопаток в непосредственной близости к ЧЭ ОВТД₁ и ОВТД₂ (происходит «распознавание» лопаток). При этом используются маркеры-разделители, встроенные в массив на этапе предварительной обработки (см. раздел 4.2). Если массив содержит коды, полученные за несколько оборотов вращения рабочего колеса, то дополнительно производится их усреднение по каждой лопатке. Затем осуществляется аппроксимация полученных выборок кодов и определение их экстремальных значений (см. раздел 4.3) [37].

Заключительным этапом является термокоррекция ГХ с учетом температуры ЧЭ датчиков и последующим вычислением искомым координат (см. раздел 4.4) [11, 12]. Полученные результаты сохраняются в памяти системы и доступны для просмотра и дальнейшего анализа.

4.2. Алгоритм предварительной обработки информации о координатах смещений торцов лопаток

В процессе предварительной обработки входной информации выполняется анализ массива (потока) измерительных цифровых данных с выхода ИЦ, выделение полезных данных и устранение избыточности (сжатие данных).

На рис. 4.2 представлены изменения во времени кодов $C(t)$ на выходе ИЦ (вариант ИЦ-НС), реализующих *meth 1* и *meth 2*. При этом изменения кодов $C(t)$ показаны в интервале времени, когда лопатка под номером 1 проходит ЧЭ₁ ОВТД₁ и ЧЭ₂ ОВТД₂, выполняющих рабочие функции, т.е. в моменты t_1 и t_4 , которым соответствуют минимумы эквивалентных индуктивностей ЧЭ (их информативных значений) и экстремальные значения кодов (см. разделы 1.2.1, 1.2.2 и рис. 1.4—1.7, раздел 3.1 и рис. 3.2, 3.3).

Если период вращения рабочего колеса T_0 и число лопаток n_d , то период появления каждой лопатки в зонах чувствительности датчиков составит $\tau_0 = T_0 / n_d$. Поскольку ЧЭ₁ и ЧЭ₂ смещены относительно

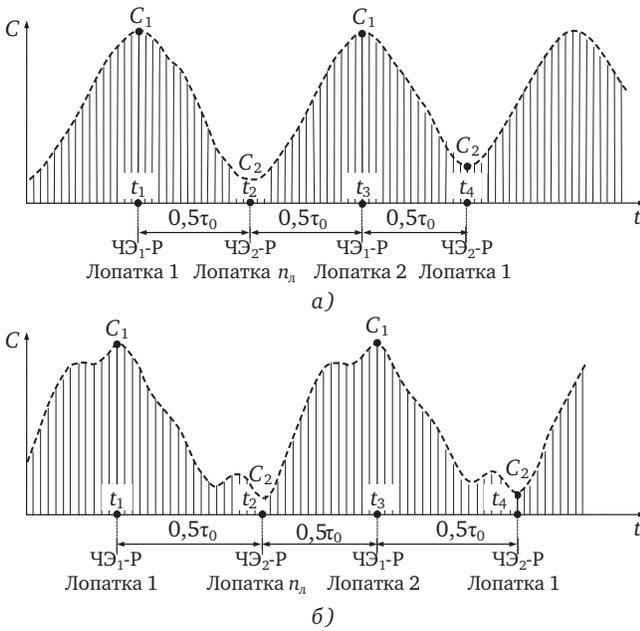


Рис. 4.2. Изменения во времени цифровых кодов на выходах ИЦ ($C(t)$), реализующих:
 а — meth 1; б — meth 2

друг друга на $1,5\Psi_{л}$, где $\Psi_{л}$ — угловой шаг установки лопаток на колесе, то интервал времени $t_4 - t_1$ составит $1,5\tau_0$, каждый из интервалов $t_2 - t_1$, $t_3 - t_2$, $t_4 - t_3$ будет равен $0,5\tau_0$. В частности, при частоте вращения рабочего колеса 3000 мин^{-1} ($T_0 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ с}$) и числе лопаток $n_{л} = 100$, период $\tau_0 = 200 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Тогда интервалы $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = t_4 - t_3 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Если частота импульсов питания составляет 10^6 Гц (период 10^{-6} с), то число отсчетов в интервале $100 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ будет 10^2 , а при частоте 10^7 Гц — 10^3 . Это означает очевидную избыточность данных при фиксации лишь экстремальных значений кодов и, как следствие, необходимость сжатия данных, поступающих с выхода ИЦ.

Разумеется, подобную диаграмму можно построить и для любой другой лопатки под номером от 2 до $n_{л}$.

Огибающая временной развертки выходных кодов ИЦ (см. рис. 4.2) имеет колебательный характер со значительным диапазоном изменения амплитудных, т.е. экстремальных значений, за-

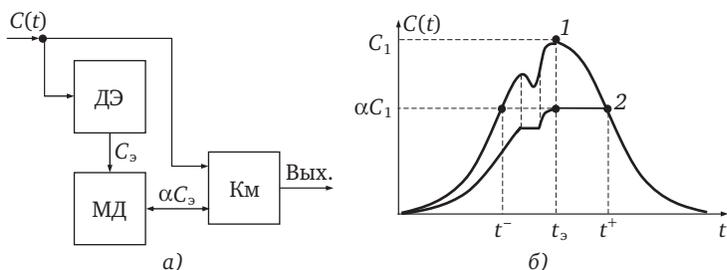


Рис. 4.3. Функциональная схема детектирования (а), диаграмма работы (б)

висящих от координат смещений торцов лопаток, причем при реализации *meth 2* наблюдается дополнительный неинформативный экстремум. В этих условиях представляется эффективным использование известного алгоритма детектирования экстремумов [38], основанного на применении адаптивного порога, величина которого зависит от экстремального значения. Этот алгоритм позволяет выделить окрестность экстремума с управляемой длительностью и осуществить сжатие.

На рис. 4.3, а показана функциональная схема базовой операции детектирования экстремальных значений кода (C_3), которая включает операции детектирования экстремума (ДЭ), масштабирующего деления (МД) и сравнения кодов (компаратор КМ). На рис. 4.3, б изображены огибающая входного кода $C(t)$ (1) и процесс формирования адаптивного порога (2) (в качестве примера рассматривается экстремальное значение кода C_1 , его максимум).

После прохождения точки экстремума в момент t_3 ДЭ фиксирует величину адаптивного порога на уровне αC_1 (где $\alpha < 1$) и на спаде сигнала происходит переключение компаратора в момент времени t^+ , сигнализирующий о том, что был детектирован экстремум. Символ «+» показывает, что выполнялась операция «прямой ход», которая характерна для реального течения времени. Однако когда входной код был оцифрован и сохранен в массиве оперативной памяти, легко выполнить подобную операцию детектирования «обратный ход», перебирая элементы массива, начиная с конца, в обратной последовательности, и получить симметричную точку t^- , как показано на рис. 4.3, б. В результате формируется зона в окрестности экстремума в интервале $[t^-, t^+]$, которая содержит полезные данные. Протяженностью этой зоны можно управлять, изменяя па-

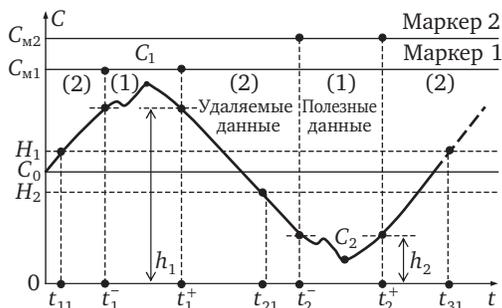


Рис. 4.4. Временная диаграмма, поясняющая выделение полезных кодов (1) и удаляемые данные (2)

раметр α . Отрезки, соответствующие полуинтервалам $t < t^-$ и $t > t^+$, могут быть удалены, как избыточные данные¹.

При реализации алгоритма на программном уровне для повышения быстродействия операцию умножения αC_1 (αC_2 для случая, когда ЧЭ₂ является рабочим) можно заменить логическими сдвигами целочисленного кода C_1 (или C_2 соответственно).

Необходимо отметить, что поскольку порог детектирования пропорционален экстремальному значению кода, оценка момента времени t^+ получается устойчивой к разбросу экстремумов, по сравнению с фиксированным порогом.

Работу алгоритма предварительной обработки временной развертки кодов на выходе ИЦ поясняет рис. 4.4, где показаны: огибающая цифровых кодов $C(t)$ при прохождении лопатками обоих ЧЭ и соответствующие информативные экстремальные значения кодов (C_1, C_2); уровень кода C_0 , который соответствует состоянию баланса входной части дифференциальной схемы ИЦ; фиксированные пороги H_1 и H_2 , задающие зону дискриминации (уровень помех); адаптивные пороги h_1 и h_2 , которые установились после прохождения экстремумов.

Для корректного восприятия и разделения элементов передаваемого массива в него встроены маркеры-разделители, которые помечают точки детектирования, ограничивающие группы полезных кодов в окрестности экстремумов. Удобный механизм для встраива-

¹ Описание процедуры детектирования максимальных значений кодов (C_1) приводится далее. Там же рассматриваются особенности детектирования минимальных значений кодов (C_2).

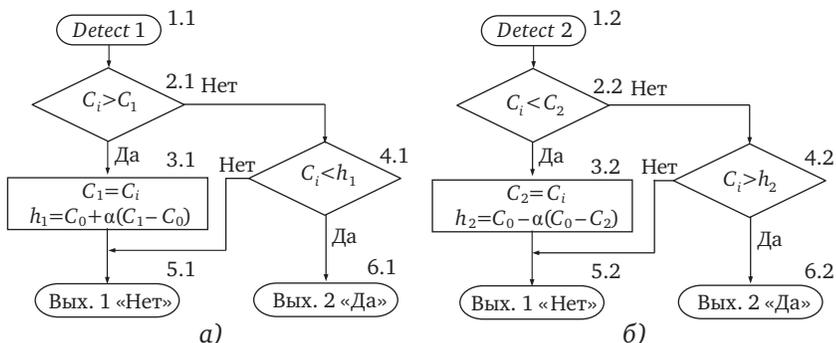


Рис. 4.5. Процедуры детектирования кодов $C(t)$ *Detect 1* (а) и *Detect 2* (б)

ния маркеров — использование незаполненных старших разрядов кодовых слов (например, 10-разрядные данные АЦП на выходе ИЦ сохраняются в 16-разрядном слове, а добавление единиц в оставшихся старших разрядах позволяет маркировать признаки, сопутствующие коду). На рис. 4.4 маркерам соответствуют уровни кодов C_{M1} и C_{M2} .

Рассматриваемый алгоритм предусматривает две процедуры детектирования экстремумов: *Detect 1* — для выделения максимумов кодов и *Detect 2* — для минимумов кодов. Блок-схемы этих процедур приведены на рис. 4.5.

Каждая из этих процедур предназначена для обработки и анализа одного конкретного отсчета цифрового кода C_i , который является входным параметром, и должна применяться в теле цикла следования отсчетов. Условные операторы 2.1 и 2.2 в сочетании с блоками 3.1 и 3.2 реализуют функции амплитудных детекторов экстремумов C_1 и C_2 соответственно, а также вычисления на их основе адаптивных порогов h_1 и h_2 . При этом учитывается наличие положительного смещения C_0 . Выражения для определения h_1 и h_2 приведены на рис. 4.5 в составе блоков 3.1 и 3.2. Условные операторы 4.1 и 4.2 выполняют функции компараторов, по срабатыванию которых фиксируется факт детектирования (Вых. 2 «Да»). Полный алгоритм предварительной обработки предусматривает применение указанных процедур на прямом и обратном ходе временной оси.

Работа полного алгоритма основана на чередовании фиксированных состояний, описание которых приведено в табл. 4.1. В режи-

Таблица 4.1. Состояние алгоритма (прямой ход)

Состояние	Описание состояния	Временные интервалы
s_0	Код отсчета в зоне $C_i < H_1$. Ожидание появления лопатки в зоне чувствительности ЧЭ ₁	$t < t_{11}$
s_1	Сохранение кодов. Ожидание момента детектирования максимума C_i	$t_{11} < t < t_{11}^+$
s_2	Код отсчета в зоне $C_i > H_2$. Ожидание появления лопатки в зоне чувствительности ЧЭ ₂	$t_{11}^+ < t < t_{21}$
s_3	Сохранение кодов. Ожидание момента детектирования минимума C_i	$t_{21} < t < t_{21}^+$

ме прямого хода выполняется обработка кодов входного потока $C(t)$ в реальном времени. При этом коды $C_i = C(i \cdot T_{\text{п}})$, поступают с периодом импульсов питания $T_{\text{п}}$.

Блок-схема алгоритма сбора и предварительной обработки данных в режиме прямого хода приведена на рис. 4.6.

В блоке 2 выполняется инициализация: установка алгоритма в исходное состояние s_0 и указателя массива *Vuf* на его начало.

Дешифратор состояний на рис. 4.6 показан в виде набора условных операторов (блоки 4.0, 4.1, 4.2, 4.3). В состоянии s_0 , при появлении лопатки в зоне ЧЭ₁ (условие 5.0), выполняется сброс памяти ДЭ и алгоритм переводится в последующее состояние s_1 (блок 6.0). В состоянии s_1 при помощи процедуры *Detect 1* (условие 5.1) выполняется поиск $C_{1\text{max}}$ с сохранением отсчетов кода C_i в массиве *Vuf* (блок 7.1). После срабатывания детектора (блок 6.1) текущий элемент массива *Vuf* помечается маркером C_{M1} , завершающим сохраненную группу кодов, алгоритм переводится последовательно в состояния s_2 и s_3 для обработки кодов прохождения лопаткой зоны чувствительности ЧЭ₂, выполняя аналогичные операции. По завершении операций в состоянии s_3 осуществляется возврат в состояние s_0 для обработки кодов следующей лопатки. После обработки кодов от каждой из $n_{\text{л}}$ лопаток (условие 8) работа прямого хода алгоритма завершается.

Во второй фазе предварительной обработки выполняется обратный ход алгоритма с целью установить маркеры C_{M1} и C_{M2} в моменты времени t^- , полностью ограничив области локализации экстремумов. При этом в качестве отсчетов C_i используются элементы массива *Vuf*, сохраненные в результате обработки при прямом ходе,

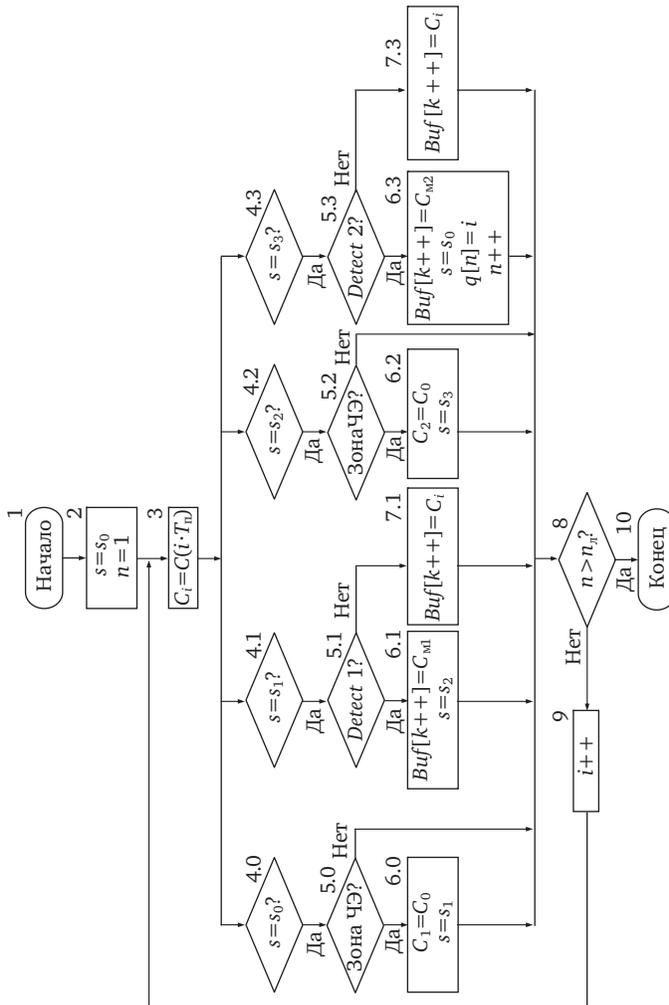


Рис. 4.6. Блок-схема алгоритма предварительной обработки

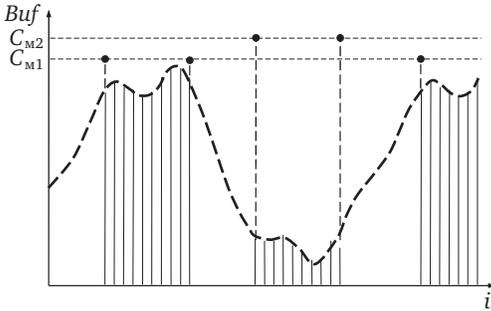


Рис. 4.7. Пример работы алгоритма

которые перебираются с конца $C_i = Bu_f[K \cdot i]$. Общая структура алгоритма аналогична изображенной на рис. 4.6, порядок следования состояний также меняется на инверсный.

После завершения алгоритма обработки выполняется селективная передача данных на верхний уровень. Передаче подлежит полезная информация между одноименными маркерами $C_{M1} - C_{M1}$ и $C_{M2} - C_{M2}$, которые ограничивают группы кодов в окрестностях выделенных экстремумов. Передача осуществляется по последовательному каналу, поэтому предварительное удаление избыточной информации повышает быстродействие системы в целом.

Начальной операцией, предшествующей описанной выше сортировке данных, является измерение величины постоянной составляющей и оценка уровня шума. Эта операция выполняется при отсутствии лопаток в зонах чувствительности обоих ЧЭ. При этом, получив выборку тестовых кодов сигнала достаточного объема, последовательно определяются среднее значение и среднеквадратичное отклонение (СКО) шумовой составляющей.

Среднее значение является оценкой постоянной составляющей C_0 , а на основе значения СКО определяются пороговые уровни для выделения полезных кодов от датчиков $H_1 = C_0 + \Delta$ и $H_2 = C_0 - \Delta$, где Δ — допустимый уровень шума. Величина зоны дискриминации (2Δ) выбирается на основе СКО, гипотезы о плотности распределения шума и априорной информации о фактической форме огибающей полезных кодов. В свою очередь, величина СКО ограничивает и максимальное значения параметра детектирования $\alpha < 1 - \delta_{ш}$, где $\delta_{ш}$ — относительный уровень шума, приведенный к значению экстремума.

Пример работы алгоритма предварительной обработки для *meth 2* приведен на рис. 4.7, где представлена результирующая информация в буферной памяти после применения прямого и обратного хода алгоритма для параметра α , равного 0,6.

4.3. Алгоритмы вычисления экстремальных значений кодов

Как отмечалось ранее, в обоих методах (*meth 1* и *meth 2*) информативным минимумам индуктивности рабочего ЧЭ при его прохождении торцами контролируемых лопаток соответствуют экстремальные значения кодов. Их поиск или вычисление осуществляются в сформированном на этапе предварительной обработки массиве данных. При этом целесообразна обработка исходного «упакованного» массива для выделения участков изменений кодов, соответствующих прохождению каждой лопаткой под ЧЭ₁ или ЧЭ₂ ОВТД в составе РК.

Указанная операция может быть сведена к преобразованию исходного одномерного «упакованного» массива C в трёхмерный массив, в котором первый элемент является идентификатором ЧЭ, выполняющим рабочие функции, второй элемент массива соответствует порядковому номеру лопатки по мере её прохождения ЧЭ, а третий элемент — это массив кодов при прохождении контролируемой лопаткой зоны чувствительности рабочего ЧЭ, который подлежит дальнейшей обработке в целях обнаружения экстремума.

На рис. 4.8 представлен алгоритм такого преобразования массива данных. Для выделения областей кодов, относящихся к ЧЭ₁ или ЧЭ₂, могут быть использованы оценки пороговых уровней H_1 и H_2 , полученные на этапе предварительной обработки данных с учетом СКО шумовой составляющей. Если значение элемента «упакованного» массива C больше порога H_1 , то его следует отнести к области кодов ЧЭ₁, и наоборот, если элемент исходного массива C ниже порога H_2 , то он относится к области кодов ЧЭ₂. Указанные процедуры выполняются в блоках (5—10) и (11—17) алгоритма соответственно. При этом привязка результатов к лопаткам (индекс b в массиве \hat{C}) учитывает лишь сдвиг ЧЭ₂ относительно ЧЭ₁ в РК (блок 12) и может меняться от замера к замеру¹.

¹ Окончательная идентификация конкретных лопаток на рабочем колесе и привязка к ним результатов измерений осуществляются на заключительном этапе работы

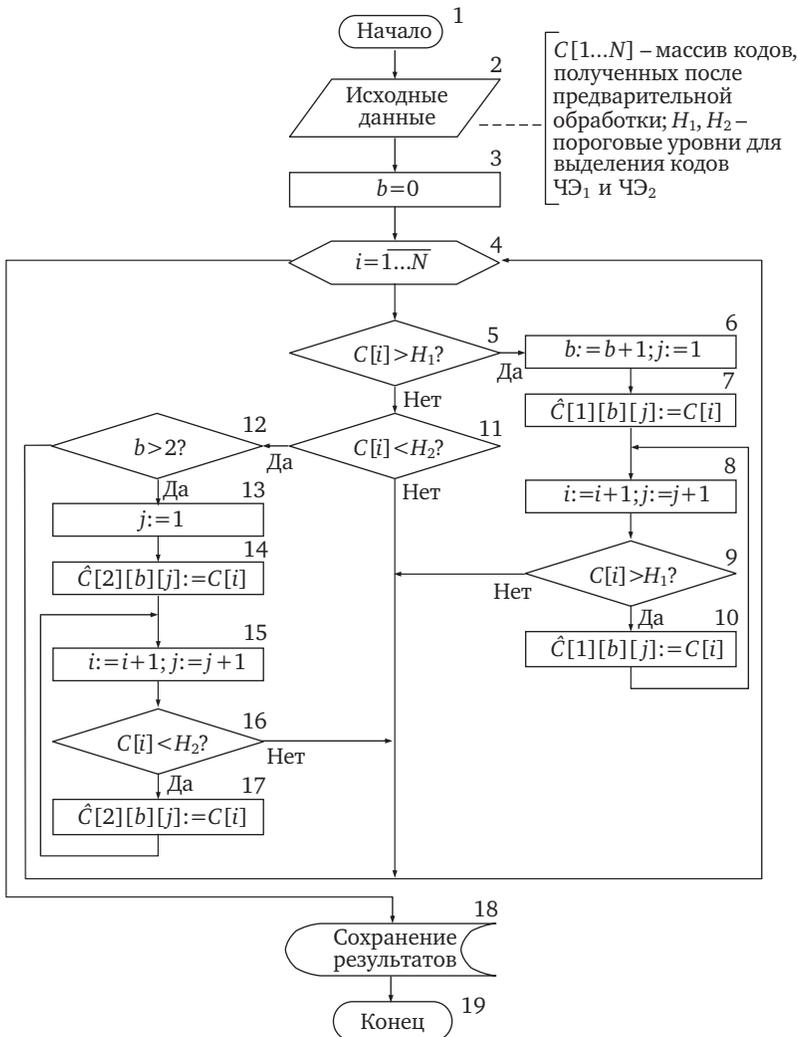


Рис. 4.8. Алгоритм выделения участков изменений кодов, соответствующих прохождению каждой лопатки зоны чувствительности ЧЭ₁ или ЧЭ₂

системы после вычисления физических значений радиальных и осевых смещений их торцов. При этом могут использоваться конструктивные особенности рабочего колеса и в качестве первой лопатки условно может выбираться самая длинная (минимальный РЗ) или самая короткая (максимальный РЗ) лопатка [39].

Учитывая дискретный характер данных в преобразованных массивах $\hat{C}[1][b]$ и $\hat{C}[2][b]$, реализации алгоритма прямого поиска экстремальных значений кодов, соответствующих информативным значениям эквивалентной индуктивности рабочего ЧЭ, приведет к возникновению соответствующей погрешности, которая в максимальной степени будет сказываться на высоких скоростях вращения рабочего колеса (подробнее исследование погрешности дискретизации рассмотрено в разделе 5). Традиционным путём уменьшения указанной составляющей погрешности является восстановление огибающей кодов путём интерполяционной обработки с последующим нахождением экстремума восстановленной функции.

Далее рассматриваются два алгоритма обработки преобразованных массивов и вычисления экстремальных значений кодов.

Первый алгоритм предполагает аппроксимацию выборок кодов на выходе ИЦ с помощью ортогональных полиномов Чебышёва I рода с последующим выделением экстремумов полученной полиномиальной функции одной переменной и уточнением значений переменной и функции в точке экстремума. Указанный алгоритм обеспечивает хорошее приближение аппроксимирующей кривой к реальной огибающей кодов (по крайней мере, для *meth 1*), однако требует повышенных вычислительных и временных ресурсов для своей реализации.

Второй алгоритм предполагает существенно упрощенный подход к поиску экстремумов функций изменений кодов, предусматривающий переход от полиномиальной аппроксимации соответствующих выборок кодов к аппроксимации кодов в локализованной зоне экстремума квадратичной параболой с последующим аналитическим нахождением координат её вершины. Такой алгоритм является наиболее универсальным с точки зрения применимости для *meth 1* и *meth 2*, а также отличается уменьшением временных и вычислительных затрат на его реализацию, но уступает по точности первому алгоритму.

4.3.1. Алгоритм вычисления экстремальных значений кодов на основе аппроксимации выборок кодов ортогональными полиномами Чебышёва I рода

Вычисление экстремальных значений кодов C_1 и C_2 , на выходе ИЦ, осуществляется в два этапа. На первом проводится аппроксимация полученных после предварительной обработки выборок кодов C_1 и C_2 . На втором этапе выделяются коды вблизи экстремума полученной полиномиальной функции одной переменной и производится уточнение значений переменной и функции в точке экстремума.

Аппроксимация экспериментальных данных осуществляется с помощью интерполяционных многочленов по методу наименьших квадратов (МНК). Используется система ортогональных полиномов Чебышева I рода, которая, в отличие от классической реализации МНК, обладает лучшей обусловленностью при больших степенях полиномов n и позволяет сократить вычислительные затраты на этапе выбора наилучшего аппроксимирующего полинома, так как не требует полного пересчета всех коэффициентов при переходе от полинома степени k к полиному степени $(k+1)$.¹

Для полиномов Чебышёва дискретной переменной известна двухслойная рекуррентная формула, по которой можно вычислить многочлен любой степени через начальные полиномы $\varphi_0(C_j)$ и $\varphi_1(C_j)$ [40—42]:

$$\begin{cases} \varphi_0(C_j) = 1; \\ \varphi_1(C_j) = C_j - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i; \\ \dots \\ \varphi_{k+1}(C_j) = (C_j - \beta_{k+1})\varphi_k(C_j) - \gamma_{k+1}\varphi_{k-1}(C_j), \quad k > 1, \end{cases} \quad (4.1)$$

где N — число точек интерполяции; $\varphi_k(C_j)$ — ортогональный полином Чебышёва дискретной переменной C_j степени k ; β_{k+1} , γ_{k+1} — коэффициенты, вычисляемые по формулам:

¹ При использовании ортогональных полиномов оценки коэффициентов полинома степени k сохраняются без изменений и определяются только коэффициенты при полиноме степени $(k+1)$ [40].

$$\beta_{k+1} = \frac{\sum_{j=1}^N C_j \varphi_k^2(C_j)}{\sum_{j=1}^N \varphi_k^2(C_j)}, \quad \gamma_{k+1} = \frac{\sum_{j=1}^N \varphi_k^2(C_j)}{\sum_{j=1}^N \varphi_{k-1}^2(C_j)}. \quad (4.2)$$

Аппроксимирующая функция $\Phi(C_j)$ определяется в виде линейной комбинации базисных функций, в качестве которых берутся полиномы Чебышёва дискретной переменной $\varphi_i(C_j)$:

$$\Phi(C_j) = \sum_{i=0}^k m_i \varphi_i(C_j), \quad (4.3)$$

где m_i — коэффициенты, вычисляемые по формуле

$$m_i = \frac{\sum_{j=1}^N f(C_j) \varphi_i(C_j)}{\sum_{j=1}^N \varphi_i^2(C_j)}. \quad (4.4)$$

Поиск наилучшего приближения осуществляется путем последовательного увеличения степени аппроксимирующего полинома $\Phi(C_j)$ и анализа остаточной дисперсии σ^2 [41]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-k-1} \sum_{j=1}^N (f(C_j) - \Phi(C_j))^2. \quad (4.5)$$

Наилучшим выбирается полином, при котором остаточная дисперсия минимальна.

Учитывая, что при оценивании неизвестных параметров по МНК выражение (4.3) и алгебраический полином степени k эквивалентны [41], то после нахождения наилучшего приближения с помощью функции $\Phi(C_j)$ (4.3), последняя может быть преобразована в традиционный степенной полином вида:

$$P(C_j) = \sum_{i=0}^k a_i^{(k-i+1)} C_j^i, \quad (4.6)$$

где $a_i^{(k-i+1)}$ — коэффициенты степенного полинома, которые могут быть рассчитаны в соответствии с рекуррентным соотношением, приведенным в источнике [40]:

$$a_i^{(l+1)} = a_i^{(l)} - a_{k-l+1}^{(l)} \frac{\sum_{i=1}^N C_j^{k-l+1} \varphi_i(C_j)}{\sum_{i=1}^N \varphi_i^2(C_j)}. \quad (4.7)$$

После того как выбран наилучший аппроксимирующий полином ($\Phi(C_j)$ или $P(C_j)$), производится поиск его экстремума. Для этого экстремум сначала локализуется, а затем координаты экстремума уточняются с заданной погрешностью ε . В целях улучшения локализации экстремумов производится расчет значений аппроксимирующей функции не только в узловых точках, но и в промежутках между ними. Затем путем простого перебора со сравнением приближенно определяются координаты экстремума аппроксимирующей функции и, если они не являются граничными ячейками массивов C_1 или C_2 , осуществляется их уточнение в пределах отрезка, ограниченного соседними точками для найденного приближенно экстремума.

Уточнение положения экстремума внутри выделенного отрезка осуществляется методом золотого сечения¹. Для этого отрезок $[C_k, C_l]$ с выделенным экстремумом делится двумя точками $p = C_k + (1 - g)(C_l - C_k)$ и $q = C_k + g(C_l - C_k)$, где $g = (1 - \sqrt{5})/2 \approx 0,618$. Точки p и q расположены симметрично относительно середины отрезка $[C_k, C_l]$, причем p производит золотое сечение отрезка $[C_k, q]$, а точка q — золотое сечение отрезка $[p, C_l]$. Далее вычисляются значения аппроксимирующей функции в точках деления, вычисленные значения сравниваются и отбрасывается та часть интервала, на котором заведомо отсутствует экстремум. Так как точки p и q производят золотые сечения отрезков $[C_k, q]$ и $[p, C_l]$ соответственно, то на оставшемся интервале определяется только одна точка, производящая золотое сечение.

Процесс деления продолжается до тех пор, пока длина интервала неопределенности не станет меньше заданной погрешности ε . При этом на каждом шаге длина нового интервала неопределенности равна $0,618$ (g) от длины предыдущего интервала. Если в результате

¹ Золотым сечением отрезка называется деление его на две неравные части так, чтобы отношение длины всего отрезка к длине большей части равнялось отношению длины большей части к длине меньшей части отрезка [43].

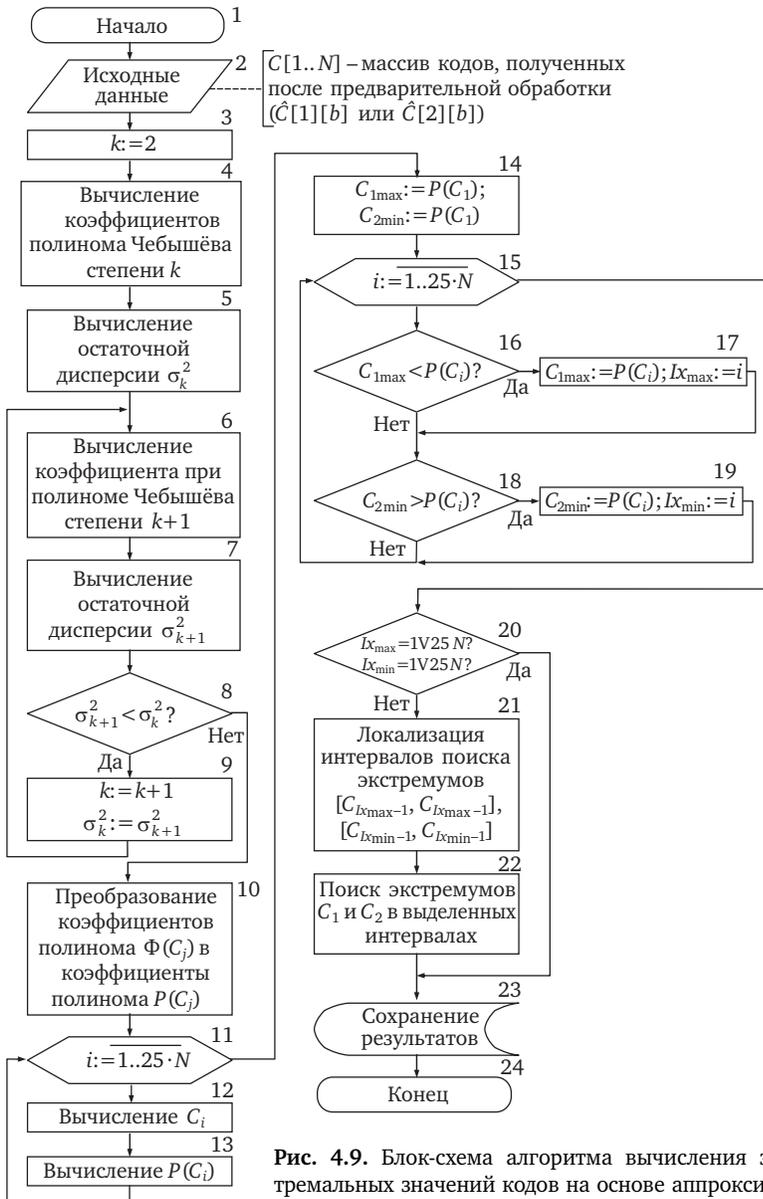


Рис. 4.9. Блок-схема алгоритма вычисления экстремальных значений кодов на основе аппроксимации выборок кодов ортогональными полиномами Чебышёва I рода

перебора в качестве экстремальных были определены значения аппроксимирующей функции для граничных элементов массивов C_1 или C_2 , то они и принимаются за искомые экстремумы.

На рис. 4.9 представлена обобщенная блок-схема алгоритма вычисления экстремальных значений кодов C_1 и C_2 , поясняющая рассмотренные выше процедуры.

После ввода исходных данных — массива кодов C (блок 2), в соответствии с выражениями (4.1)—(4.4) производится аппроксимация заданной таблично функции полиномами Чебышёва I рода второго порядка¹ ($k=2$) (блок 4) и на основании (4.5) определяется остаточная дисперсия σ_k^2 (блок 5).

Далее в цикле (блоки 6—9) осуществляется поиск наилучшего приближения к реальной огибающей кодов C , для чего степень аппроксимирующего полинома увеличивается на 1. При этом, учитывая свойства ортогональных полиномов, все полученные ранее оценки коэффициентов сохраняются и находится только оценка коэффициента m_{k+1} (4.4) при ортогональном полиноме $\varphi_{k+1}(C_j)$ (4.3).

После того как определен полином степени $(k+1)$, для него производится расчет остаточной дисперсии σ_{k+1}^2 (блок 7) и сравнение ее с σ_k^2 (блок 8). Если остаточная дисперсия уменьшилась, то степень аппроксимирующего полинома увеличивается на 1 и цикл начинается снова. Если уменьшения остаточной дисперсии не произошло, то в качестве наилучшего выбирается полином степени k .

На следующем шаге алгоритма производится преобразование коэффициентов полинома Чебышёва в коэффициенты традиционного алгебраического полинома (блок 10) в соответствии с (4.6), (4.7). Полученный алгебраический полином рассчитывается во всех узловых точках интерполяции, а также в промежутках между ними, для чего отрезок между соседними узлами интерполяции делится на 24 равных участка (блоки 11—13).

Затем осуществляется приближенный поиск экстремумов полученной «сглаженной» аппроксимирующей функции (блоки 14—19). Если экстремумом является первый или последний элемент рассчитанного массива, то эти значения запоминаются и используются в последующих вычислениях физических значений радиальных и осевых смещений. Если же экстремум находится внутри массива, то сначала

¹ Выбор в качестве начального приближения полинома Чебышёва второго порядка обусловлен анализом реальных зависимостей кодов на выходе ИЦ.

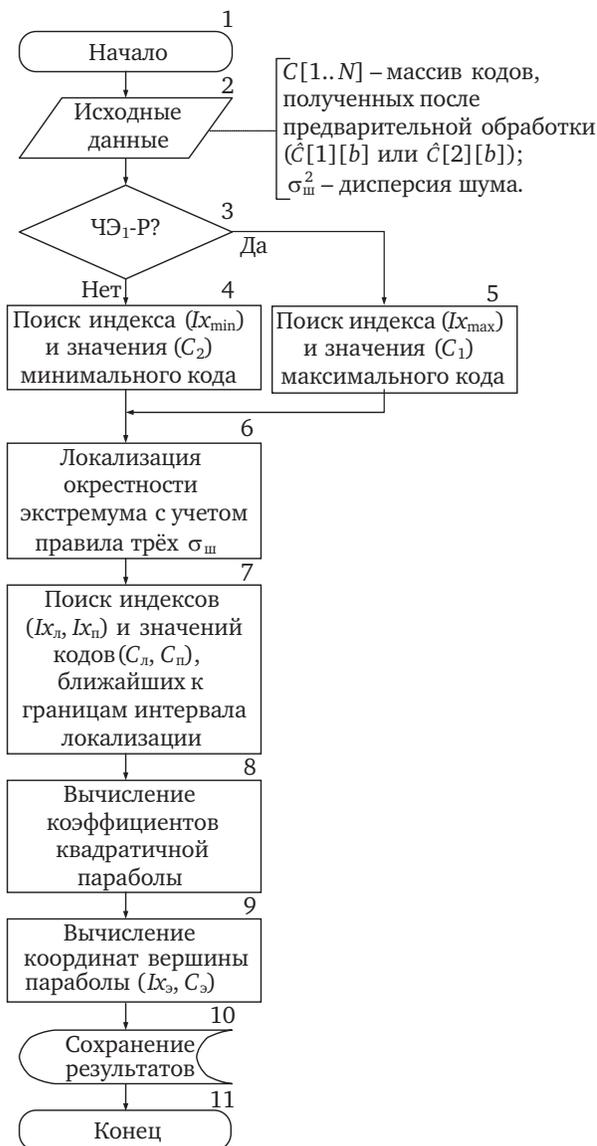


Рис. 4.10. Блок-схема алгоритма вычисления экстремальных значений кодов на основе аппроксимации зоны экстремума квадратичной параболой

выделяется интервал поиска путем выбора отрезка между предшествующим и последующим элементами (блок 21), а затем осуществляется собственно поиск уточненного экстремума методом золотого сечения (блок 22). Полученный результат также запоминается и используется в дальнейших алгоритмах расчета физических значений радиальных и осевых смещений.

4.3.2. Алгоритм вычисления экстремальных значений кодов на основе аппроксимации зоны экстремума квадратичной параболой

Так же, как и в алгоритме, приведенном в разделе 4.3.1, вычисление экстремальных значений кодов C_1 и C_2 осуществляется в два этапа. На первом проводится выделение кодов вблизи экстремума, а затем (на втором этапе) выбранный участок заменяется квадратичной параболой и аналитически находятся координаты её вершины, т.е. координаты искомого экстремума.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 4.10. После ввода исходных данных (блок 2), которыми являются массив кодов (C) и дисперсия шума ($\sigma_{\text{ш}}^2$), определяемая на этапе подготовки к измерениям, осуществляется выделение кодов вблизи экстремума (блоки 3—7). Для этого сначала прямым поиском в массиве C определяются экстремумы кодов — максимум (C_1), если рабочим является ЧЭ₁ (блок 4) и минимум (C_2), если рабочим является ЧЭ₂ (блок 5), а затем производится выделение окрестности найденного экстремума с учётом правила трёх $\sigma_{\text{ш}}$ [44] (блок 6). В локализованной таким образом окрестности экстремума, также путём прямого поиска со сравнением, определяются коды, ближайšie к левой и правой границам локализации ($C_{\text{л}}$, $C_{\text{п}}$) (блок 7).

На завершающем этапе работы алгоритма производится аппроксимация выделенных кодов в окрестности экстремума квадратичной параболой $y = ax^2 + bx + c$ (где a , b , c — коэффициенты параболы) и находятся координаты её вершины. Для этого на первом шаге по найденным кодам ($C_{\text{э}}$, $C_{\text{л}}$, $C_{\text{п}}$, где $C_{\text{э}}$ — это C_1 или C_2) и их индексам ($I_{x_{\text{э}}}$, $I_{x_{\text{л}}}$, $I_{x_{\text{п}}}$) в исходном массиве C рассчитываются коэффициенты параболы по трём точкам ($(I_{x_{\text{л}}}; C_{\text{л}})$, $(I_{x_{\text{э}}}; C_{\text{э}})$, $(I_{x_{\text{п}}}; C_{\text{п}})$) (блок 8):

$$a = \frac{C_{\text{п}} - \frac{I_{x_{\text{п}}}(C_{\text{э}} - C_{\text{л}}) + I_{x_{\text{э}}}C_{\text{л}} - I_{x_{\text{л}}}C_{\text{э}}}{I_{x_{\text{э}}} - I_{x_{\text{л}}}}}{I_{x_{\text{п}}}(I_{x_{\text{п}}} - I_{x_{\text{л}}} - I_{x_{\text{э}}}) + I_{x_{\text{л}}}I_{x_{\text{э}}}};$$

$$b = \frac{C_3 - C_{II}}{Ix_3 - Ix_L} + a(Ix_L + Ix_3);$$

$$c = \frac{Ix_3 C_L - Ix_L C_3}{Ix_3 - Ix_L} + a Ix_L Ix_3. \quad (4.8)$$

Затем по известным аналитическим формулам находится абсцисса (Ix_3) и ордината (C_3) вершины параболы (блок 9):

$$Ix_3 = -\frac{b}{2a}; \quad C_3 = -\frac{D}{4a}, \quad (4.9)$$

где $D = b^2 - 4ac$ — дискриминант.

Найденное значение C_3 принимается за истинное значение экстремума кодов в канале с РК из двух ОВТД, сохраняется (блок 10) и используется в дальнейшем в алгоритме расчета физических значений измеряемых радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы.

4.4. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток

Результаты алгоритма вычисления экстремальных значений кодов (см. раздел 4.3) — это коды C_1 и C_2 , соответствующие изменениям эквивалентных индуктивностей ЧЭ₁ ОВТД₁ и ЧЭ₂ ОВТД₂, для которых необходимо вычислить значения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, т.е. координат x и y соответственно.

Вычисление координат x и y осуществляется, как уже отмечалось (см. раздел 1), на основе семейства ГХ и текущих значений кодов C_1 и C_2 с помощью численного метода Ньютона при аппроксимации семейства ГХ полиномиальными функциями нескольких переменных или с использованием кусочно-линейной интерполяции [7, 45]. На рис. 4.11 приведена геометрическая интерпретация определения искомых координат смещений [1, 15], предусматривающего решение системы из двух уравнений:

$$\begin{cases} C_1 = C_1(x, y); \\ C_2 = C_2(x, y), \end{cases} \quad (4.10)$$

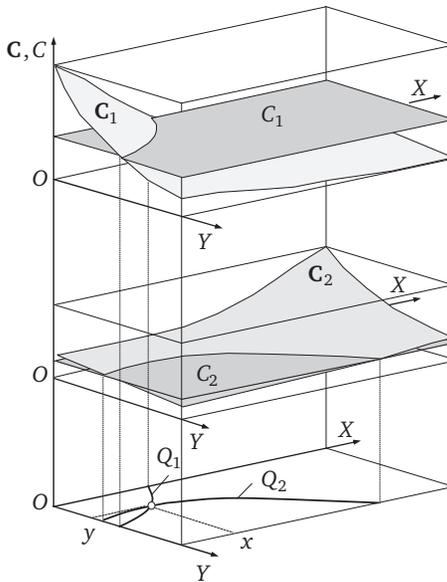


Рис. 4.11. Геометрическая интерпретация определения x , y -координат на основе метода Ньютона

где $C_1(x, y)$, $C_2(x, y)$ — ГХ ИЦ, включающей датчики ОВТД₁ и ОВТД₂. Семейство ГХ представляет собой поверхности $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$, а экстремальным кодам C_1 и C_2 соответствуют плоскости, параллельные плоскости OXY . Поверхности $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ пересекаются с плоскостями C_1 и C_2 , а проекции линий пересечения на плоскость OXY обозначены Q_1 и Q_2 . Искомые x и y координаты соответствуют точке пересечения проекций Q_1 и Q_2 на плоскости OXY .

Поиск решения системы (4.10) представляет собой итерационный процесс, который характеризуется повторяющимся построением секущих на проекциях Q_1 и Q_2 . Координаты точки пересечения секущих на последней итерации являются искомыми значениями x и y .

Известным ограничением метода является обязательное условие монотонности ГХ [7, 15] (отсутствие локальных экстремумов на проекциях Q_1 и Q_2). Этому условию соответствуют ИЦ, в которых реализован *meth 1*. Вместе с тем, в ГХ ИЦ, реализующих *meth 2*, наблюдается немонотонность, а в проекциях Q_1 и Q_2 — экстремумы.

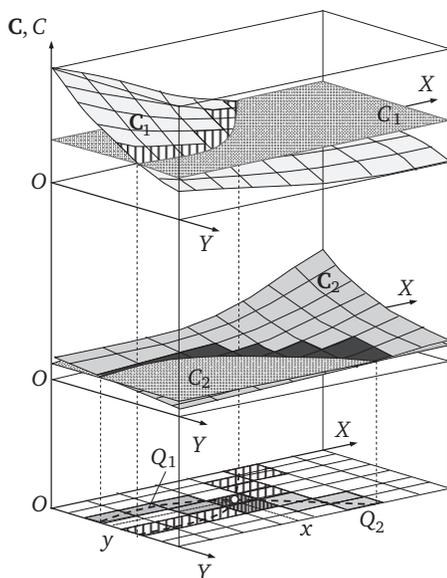


Рис. 4.12. Геометрическая интерпретация предлагаемого алгоритма определения x, y -координат

В настоящем разделе приводится описание алгоритма вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток (y, x -координат), свободного от указанного ограничения. В предлагаемом алгоритме семейство ГХ (4.10) представлено в виде таблиц, а на рис. 4.12 — поверхностями $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ с нанесенными на них сетками, которым соответствует сетка на плоскости OXY (точнее, узлы сеток, приведенные в таблице).

На рис. 4.13, а изображена только плоскость OXY с фрагментом координатной сетки и значениями табличных кодов ГХ C_1 и C_2 , причем координатные линии ограничивают лишь те ячейки прямоугольной формы из возможного множества (см. рис. 4.12), которые находятся в окрестности ячейки, где пересекаются проекции Q_1 и Q_2 .

Особенность предлагаемого алгоритма состоит в том, что в нем отпадает необходимость поиска линий пересечения поверхностей $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ с плоскостями C_1 и C_2 , а также проекций Q_1 и Q_2 в аналитическом виде. Вместо этого на первом этапе предлагаемый алгоритм выполняет поиск «зон пересечений», образованных ячей-

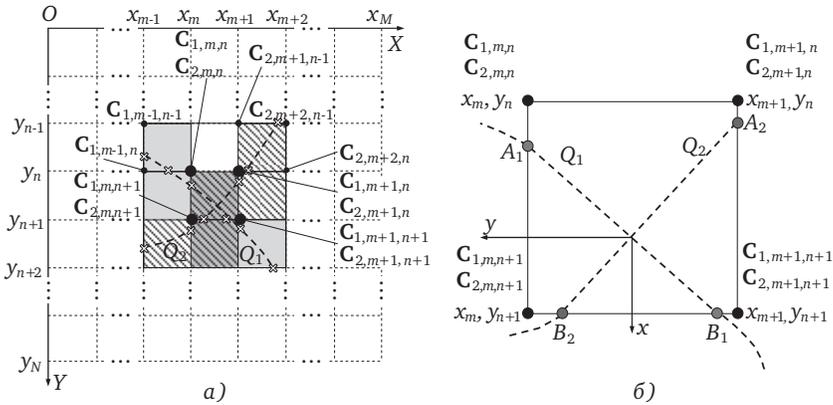


Рис. 4.13. Фрагмент сетки градуировочной таблицы на плоскости OXY (а) и ячейка с пересечением Q_1 и Q_2 (б)

ками, в которых проходят и Q_1 , и Q_2 . Проверяется каждая пара координат и кодов ячеек в направлении оси X , а затем оси Y для обеих градуировочных таблиц.

На рис. 4.12 штриховкой показаны «зоны пересечений» поверхности $C_1(x, y)$ с плоскостью C_1 , а затемнением — поверхности $C_2(x, y)$ с плоскостью C_2 . На том же рис. 4.12 и на рис. 4.13, а в плоскости OXY штриховкой показаны ячейки, через которые проходят проекции Q_2 , а затемнением — ячейки с проекцией Q_1 (проекции Q_1 и Q_2 изображены штриховой линией). Кроме того, крестиками на границах ячеек (рис. 4.13, а) обозначены коды экстремальных значений C_1 и C_2 , которые совпадают с точками проекций Q_1 и Q_2 . Там же приведены табличные коды в узлах ячеек, для которых справедлива неравенства:

для ячейки с узлами $(m-1, n-1)$, $(m, n-1)$, $(m-1, n)$, (m, n) :

$$C_{1,m-1,n-1} < C_1 < C_{1,m,n-1}; C_{1,m-1,n} < C_1 < C_{1,m,n};$$

для ячейки с узлами $(m+1, n-1)$, $(m+2, n-1)$, $(m+1, n)$, $(m+2, n)$:

$$C_{2,m+1,n-1} < C_2 < C_{2,m+2,n-1}; C_{2,m+1,n} < C_2 < C_{2,m+2,n}.$$

Подобные неравенства можно записать и для остальных ячеек «зон пересечения». Ячейки, где проходят обе проекции, выделены штриховкой на затемненном фоне. Выбранные ячейки запоминаются для последующей обработки.

На рис. 4.13, б приведено укрупненное изображение ячейки с пересечением Q_1 и Q_2 , где обозначены точки входа (A_1, A_2) и выхода (B_1, B_2) проекций.

На втором этапе работы алгоритма анализируются выбранные ранее ячейки. Используя линейную интерполяцию, вычисляются координаты точек A_1, A_2, B_1, B_2 по координатам и величинам кодов в прилегающих узлах. Ниже приведен пример этих вычислений для ячейки на рис. 4.13, б:

$$x_{11} = \frac{(C_1 - C_{m,n})(x_m - x_m)}{(C_{m,n+1} - C_{m,n})} + x_m;$$

$$y_{11} = \frac{(C_1 - C_{m,n})(y_{n+1} - y_n)}{(C_{m,n+1} - C_{m,n})} + y_n;$$

$$x_{12} = \frac{(C_1 - C_{m,n+1})(x_{m+1} - x_m)}{(C_{m+1,n+1} - C_{m,n+1})} + x_m;$$

$$y_{12} = \frac{(C_1 - C_{m,n+1})(y_{n+1} - y_{n+1})}{(C_{m+1,n+1} - C_{m,n+1})} + y_{n+1};$$

$$x_{21} = \frac{(C_2 - C_{m+1,n})(x_{m+1} - x_{m+1})}{(C_{m+1,n+1} - C_{m+1,n})} + x_{m+1};$$

$$y_{21} = \frac{(C_2 - C_{m+1,n})(y_{n+1} - y_n)}{(C_{m+1,n+1} - C_{m+1,n})} + y_n;$$

$$x_{22} = \frac{(C_2 - C_{m,n+1})(x_{m+1} - x_m)}{(C_{m+1,n+1} - C_{m,n+1})} + x_m;$$

$$y_{22} = \frac{(C_2 - C_{m,n+1})(y_{n+1} - y_{n+1})}{(C_{m+1,n+1} - C_{m,n+1})} + y_{n+1}.$$

Индексы координат точек входа и выхода проекций в ячейку имеют следующие обозначения: первый — номер проекции (1 или 2), второй — 1 — для точки входа, 2 — для точки выхода; $x_m, x_{m+1}, y_n, y_{n+1}$ — координаты узлов ячейки; $C_{m,n}, C_{m+1,n}, C_{m,n+1}, C_{m+1,n+1}$ — коды, соответствующие этим координатам. При этом точки входа

$A_1(x_{11}, y_{11})$, $A_2(x_{21}, y_{21})$ и выхода $B_1(x_{12}, y_{12})$, $B_2(x_{22}, y_{22})$, могут располагаться на любой из четырех сторон ячейки. Через полученные точки проводятся два отрезка прямых A_1B_1 и A_2B_2 , координаты точки пересечения которых являются искомыми значениями y и x , а также решением системы из двух линейных уравнений, что не вызывает каких-либо трудностей, и в этой связи здесь не приводится.

На рис. 4.14 представлена блок-схема рассмотренного алгоритма вычисления координат y , x .

В блоке 3 происходит формирование массива ячеек, попадающих в «зону пересечения». Далее в блоках 5—9, в цикле, производится анализ выбранных ячеек и определение ячейки, в которой пересекаются Q_1 и Q_2 . В блоке 10 производится решение системы линейных уравнений, результатом которого являются искомые координаты x и y для экстремальных кодов C_1 и C_2 . Если после анализа всех ячеек (проверка номера текущей ячейки на попадание в общее множество ячеек (M — число ячеек по оси X ; N — число ячеек по оси Y)) производится в блоке 5) пересечение Q_1 и Q_2 не обнаружено, то программа завершается сообщением об отсутствии решения (блок 12).

Далее рассмотрен вопрос о термокоррекции семейства ГХ.

Как уже отмечалось, выходные параметры ЧЭ (эквивалентные индуктивности), которые определяются изменениями радиальных и осевых смещений (координатами y и x), преобразуются в цифровые коды, а затем решается система уравнений (4.10), полученная на основе семейства ГХ, а также текущих значений кодов C_1 и C_2 . Однако ЧЭ ОВТД, находясь в газовой среде, подвергаются существенным температурным воздействиям — свыше 1000°C в турбине, что является причиной значительных температурных изменений индуктивности ЧЭ и, как следствие, соответствующих изменений искомых координат. Поэтому при получении измерительной информации о радиальных и осевых смещениях (y и x координатах), производится термокоррекция, предусматривающая экспериментальное определение семейства ГХ во всем диапазоне температур Θ ($C_1(x, y, \Theta)$ и $C_2(x, y, \Theta)$), а также измерение текущих значений температуры ЧЭ с помощью ТП, встроенных в ОВТД. В системе предусмотрены также специальные каналы термокоррекции, в которых осуществляется нормализация сигналов ТП (рис. 4.1), преобразование в код, расчет физических значений Θ с последующим приведением уравнений ГХ $C_1(x, y, \Theta)$ и $C_2(x, y, \Theta)$ к виду, пред-

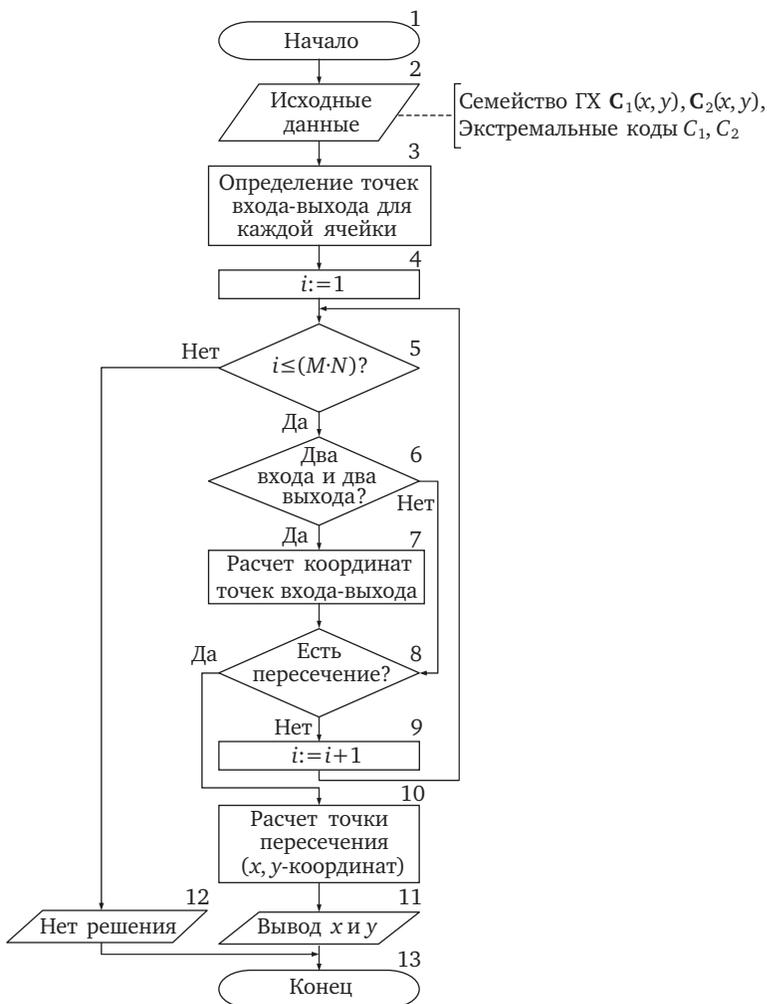


Рис. 4.14. Блок-схема алгоритма вычисления u, x -координат

ставленному на рис. 4.13, и вычисление координат u и x с учетом этой температуры Θ [1, 2].

Термокоррекция семейств ГХ осуществляется с использованием линейной интерполяции. Найденное текущее значение температуры анализируется и в градуировочных таблицах выбирается наи-

более подходящий диапазон температур, отвечающий требованию $\Theta_{i-1} < \Theta < \Theta_i$. В этом диапазоне для каждой пары координат y, x находится значение кода, соответствующее измеренной температуре с использованием формулы линейной интерполяции. Для термореакции эта формула имеет вид:

$$C = \frac{(\Theta - \Theta_i) \cdot (C_{i+1} - C_i)}{(\Theta_{i+1} - \Theta_i)} + C_i,$$

где Θ_i, Θ_{i+1} — значения границ диапазона температуры в ГХ, в который попадает значение Θ ; C_i, C_{i+1} — коды, соответствующие координатам x, y для Θ_i, Θ_{i+1} ; C — искомый код, соответствующий Θ .

Заклучение к разделу 4

Разработаны принципы построения системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток на уровне обобщённой структурно-функциональной схемы и основных алгоритмов функционирования системы.

Разработан алгоритм предварительной обработки информации о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток, который предусматривает применение адаптивного сжатия, зависящего от экстремальных значений кодов, определяемых индуктивностями ЧЭ ОВТД₁ и ОВТД₂. Алгоритм обеспечивает передачу полезной информации на верхний уровень в ограниченном объеме (только тех данных, которые расположены в окрестностях экстремумов кодов, соответствующих прохождению лопаткой ЧЭ ОВТД₁ и ОВТД₂).

Разработан алгоритм поиска экстремальных значений кодов, а также два алгоритма аппроксимации кодов (после предварительной обработки) и вычисления экстремумов. Первый алгоритм аппроксимации предусматривает аппроксимацию выборок кодов (сжатых данных) с помощью ортогональных полиномов Чебышёва I рода с последующим выделением экстремумов полученной полиномиальной функции одной переменной и уточнением значений переменной и функции в точке экстремума. Этот алгоритм обеспечивает хорошее приближение аппроксимирующей кривой к реальной огибающей кодов (по крайней мере, для $meth\ 1$), однако требует повышенных вычислительных и временных ресурсов для своей реализации. Второй алгоритм предусматривает существенно упрощенный

подход к поиску экстремумов, в котором осуществляется переход от полиномиальной аппроксимации соответствующих выборок кодов к аппроксимации кодов в локализованной зоне экстремума квадратичной параболой с последующим расчетом координат её вершины. Такой алгоритм является наиболее универсальным с точки зрения применимости для *meth 1* и *meth 2*, а также отличается уменьшением временных и вычислительных затрат на его реализацию, но уступает по точности первому алгоритму.

Разработан алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток (координат y и x), который предусматривает табличное представление семейства ГХ, где каждая из таблиц содержит множество ячеек, определяемых шагом изменений координат x и y в процессе получения ГХ, причем каждой из ячеек соответствуют указанные в таблице значения цифровых кодов. В процессе последовательного перебора ячеек производится сравнение экстремальных значений кодов с табличными. Процесс останавливается на ячейке с наилучшим приближением сравниваемых кодов в обеих таблицах. Искомое решение находится в пределах этой ячейки путем решения системы из двух линейных уравнений. От существующих алгоритмов, применяемых в системах измерения координат смещений, построенных на основе кластерных методов, разработанный алгоритм вычисления отличается возможностью использования немонотонных ГХ при наличии экстремумов в диапазоне изменений осевого смещения (координаты x), что характерно при использовании в системе *meth 2*.

Погрешности системы измерения

Известно, что в существующих системах, построенных на основе кластерных методов измерения x, y -координат смещения торцов лопаток с РК из двух ОВТД на входе, используются семейства ГХ в виде зависимостей цифровых кодов на выходе ИЦ от искомым координат и температуры среды ($C_1(x, y, \Theta)$ и $C_2(x, y, \Theta)$) [1, 2]. Однако осуществить процедуру градуировки на реальных компрессорах или турбинах ГТД не представляется возможным, а потому применяются специальные градуировочные устройства и термокамеры, оснащенные необходимым измерительным оборудованием [1]. При этом в градуировочном устройстве предусматривается установка только одной лопатки того же типа, тех же размеров и из того же материала, что используется на рабочем колесе. В свою очередь, в существующей методике получения ГХ предполагается, что только рабочий ЧЭ взаимодействует с торцом лопатки, а компенсационный ЧЭ расположен вне зоны взаимодействия.

Вместе с тем, в современных и перспективных турбинах авиационных ГТД шаг установки лопаток может быть невелик и в линейном выражении соизмерим с длиной ЧЭ. Это означает, что соседние лопатки будут оказывать влияние на полезные изменения эквивалентной индуктивности ЧЭ, причем это влияние может оказаться весьма существенным и, будучи неучтенным в семействе ГХ, станет причиной серьезных погрешностей системы измерения.

Следует также отметить, что до последнего времени влияние соседних лопаток оставалось неизученным. Поэтому в настоящем разделе исследуется влияние соседних лопаток как на эквивалентные индуктивности ЧЭ, так и на выходные коды ИЦ, включающие ОВТД в составе РК. Кроме того, рассматриваются защитные меры, обеспечивающие уменьшение влияния соседних лопаток и связанных с ним погрешностей [46, 47].

Казалось бы, получение семейства ГХ ($C_1(x, y, \Theta)$ и $C_2(x, y, \Theta)$) с помощью градуировочного устройства и термокамеры в сочетании с каналами термокоррекции в виде встроенных в датчик ТП, устройств нормализации их сигналов, АЦП в составе системы измерения и соответствующих алгоритмов (см. разделы 4.1 и 4.4), реализуемых в программном обеспечении (ПО), позволяют устранить влияния температуры в газозвоздушном тракте и соответствующее снижение погрешностей.

Однако особенность системы измерения, в которой используется вариант ИЦ-НС, состоит в том, что значения кода C_{\max} , соответствующие информативным значениям эквивалентных индуктивностей ЧЭ₁, выполняющего рабочие функции, должны находиться в интервале кодов от 512 до 1024, а значения кода C_{\min} , соответствующие информативным значениям эквивалентных индуктивностей ЧЭ₂, выполняющего рабочие функции, — в интервале от 512 до 0. При нарушении этого условия (а оно возможно при изменениях кода, связанных с большими изменениями температуры) нарушается штатный режим работы системы и для его восстановления необходима корректировка параметров элементов ИЦ. Чтобы исключить подобные события, необходимы предварительные исследования влияния температуры на эквивалентные индуктивности ЧЭ, выполняющих рабочие и компенсационные функции в дифференциальной ИЦ, а также на выходные коды в такой ИЦ.

Кроме того, исследуется точность измерения температуры ЧЭ в канале термокоррекции системы и метод её повышения, что, в конечном счете, обеспечивает снижение температурной погрешности вычисления искомым координат смещения торцов лопаток [48—51].

В заключение настоящего раздела приводятся оценки погрешности определения экстремумов кодов в зависимости от скорости вращения рабочего колеса и частоты импульсного питания ИЦ, а также погрешности вычисления x, y -координат в зависимости от величины выбранного шага радиальных и осевых смещений в процессе получения ГХ [52, 53].

5.1. Влияние соседних лопаток и уменьшение связанных с ним погрешностей

В разделе 2, где приводится описание модели ЭМВ ЧЭ и контролируемой лопатки, влияние соседних лопаток не учитывалось. Поэтому в настоящем разделе рассматриваются вновь разработанные модели ЭМВ ЧЭ обоих ОВТД в составе РК с контролируемой и соседними лопатками, а также приводятся результаты исследований влияния соседних лопаток как на эквивалентные индуктивности ЧЭ, проведенных с помощью таких моделей, так и на цифровые коды на выходе ИЦ. Кроме того, дано описание защитных мер по уменьшению влияния соседних лопаток и связанных с ним погрешностей, в том числе предлагаемой методики получения семейства ГХ системы измерения.

5.1.1. Исследование влияния соседних лопаток на эквивалентные индуктивности чувствительных элементов

Изложению результатов исследований предшествует описание вновь разработанных моделей ЭМВ обоих ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками, которые использовались в этих исследованиях.

Модели ЭМВ ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками. Основой вновь разработанных моделей является существующая модель ЭМВ ЧЭ с торцом контролируемой лопатки с учётом её объема и формы (см. раздел 2.2). В отличие от существующей, во вновь разработанных предусмотрены два варианта: в первом ЭМВ осуществляется между ЧЭ и контролируемой лопаткой, находящейся на минимальном расстоянии от ЧЭ, а также с двумя соседними лопатками, каждая из которых находится на расстоянии шага $\Psi_{\text{л}}$ ($z_{\text{л}}$) от контролируемой (имитируется функционирование рабочего ЧЭ (ЧЭ-Р) в РК ОВТД, рис. 5.1, а); во втором варианте ЭМВ осуществляется между ЧЭ и двумя лопатками, находящимися на расстоянии, равном $0,5\Psi_{\text{л}}$ ($0,5z_{\text{л}}$) от центра ЧЭ (имитируется функционирование компенсационного ЧЭ (ЧЭ-К), рис. 5.1, б)¹.

¹ На рис. 5.1, а, б угол разворота ЧЭ и его размещение в хвостовой части лопатки соответствует *meth 1* (см. рис. 1.4). Разумеется, на рис. 5.1, а, б угол разворота ЧЭ и его размещение относительно лопатки изменяются, если используется *meth 2* (см. рис. 1.6).

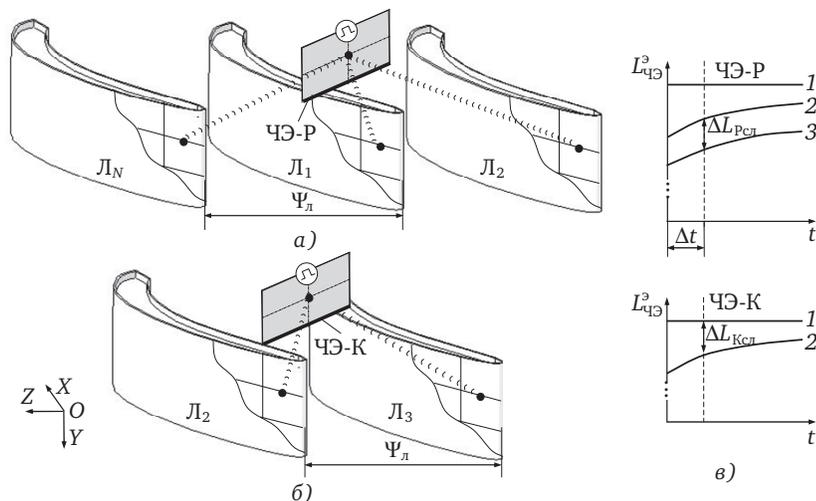


Рис. 5.1. Взаимодействие ЧЭ-Р с контролируемой и соседними лопатками (Л) (а), ЧЭ-К с соседними лопатками (б) и изменения эквивалентных индуктивностей ЧЭ-Р и ЧЭ-К во времени (в)

При этом в изменениях эквивалентных индуктивностей ЧЭ учитывается совокупное влияние вихревых токов во всех лопатках. На рис. 5.1, в это влияние показано на графиках $L_{\text{ЧЭ}}^3(t)$ отдельно для ЧЭ-Р и ЧЭ-К, причём графики 1, как для ЧЭ-Р, так и для ЧЭ-К демонстрируют постоянство во времени эквивалентных индуктивностей и равенство $L_{\text{ЧЭ},\infty}^3$ при отсутствии лопаток, а штриховые линии ограничивают во времени длительность импульса питания Δt и соответствуют его заднему фронту.

Для ЧЭ-Р графики 2 и 3 — это изменения эквивалентной индуктивности при отсутствии соседних лопаток и их наличии соответственно. Точки пересечения этих графиков с пунктирной линией характеризуют информативные значения эквивалентных индуктивностей ЧЭ, а их разность ($\Delta L_{\text{Рсл}}$) — влияние соседних лопаток. Для ЧЭ-К график 2 — это изменение эквивалентной индуктивности с учётом соседних лопаток, а разность эквивалентных индуктивностей (графики 2 и 1) в момент окончания импульса питания (пунктирная линия) характеризует влияние соседних лопаток на ЧЭ-К ($\Delta L_{\text{Ксл}}$).

Далее приводятся результаты вычислительных экспериментов, в которых использовалась разработанная модель.

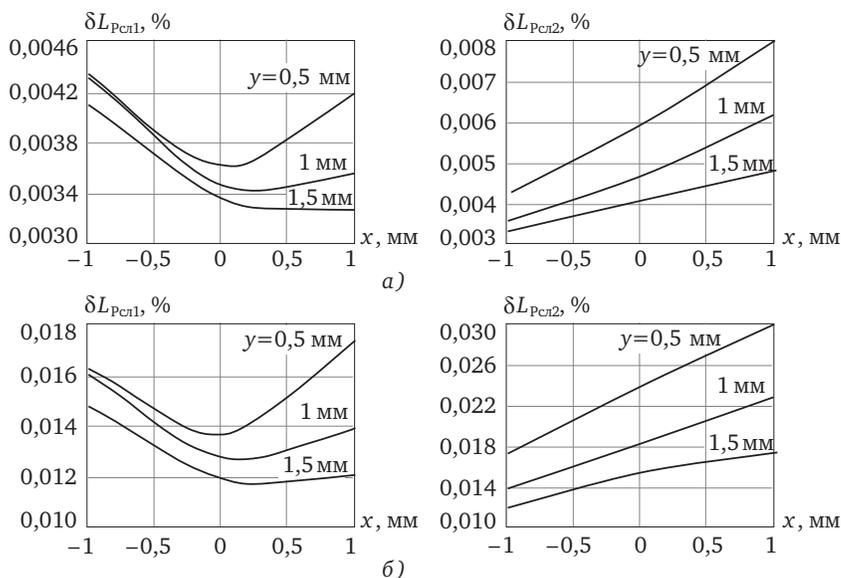


Рис. 5.2. ФВ соседних лопаток на рабочие ЧЭ $\delta L_{Pсн1}(x, y)$ и $\delta L_{Pсн2}(x, y)$ при (*meth 1*):
 а — $z_d = 32$ мм; б — $z_d = 26$ мм

Результаты моделирования функций преобразования и оценка влияния соседних лопаток на эквивалентные индуктивности ЧЭ. Вычислительные эксперименты были выполнены в соответствии с методикой, приведенной в разделе 2.5, а исходные данные представлены в разделе 2.2, в том числе в табл. 2.1.

Проведены две серии экспериментов — в первой предполагалось, что для измерения x, y -координат используется *meth 1*, во второй — *meth 2*.

Семейства ФП ЧЭ₁ и ЧЭ₂, выполняющих рабочие функции в РК ОВТД, в предположении отсутствия соседних лопаток ($z_d \rightarrow \infty$), полученные в первой серии экспериментов, идентичны представленным в разделе 2.5 (см. рис. 2.16) и здесь не приводятся.

Влияние соседних лопаток на семейства ФП, представленных на рис. 2.16, оценивается с помощью разности информативных значений эквивалентных индуктивностей ЧЭ, выполняющих рабочие функции — $\Delta L_{Pсн}$ (рис. 5.1, в). Результаты вычислений, в свою очередь, представлены на рис. 5.2 в виде семейств функций влияния

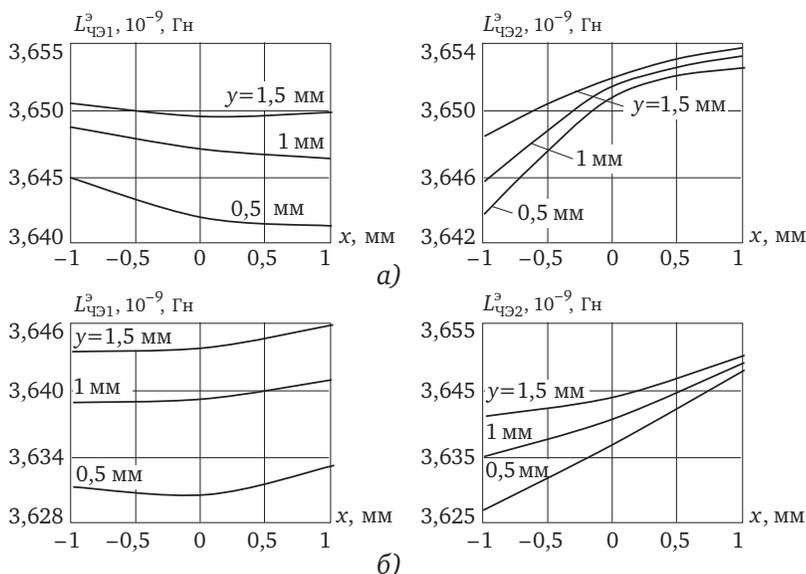


Рис. 5.3. Семейства ФП компенсационных ЧЭ при наличии соседних лопаток, установленных с шагом $z_l = 32$ мм (а) и $z_l = 26$ мм (б) (ЧЭ₁-К функционирует в паре с ЧЭ₂-Р, а ЧЭ₂-К — с ЧЭ₁-Р) (meth 1)

(ФВ) $\delta L_{P_{cl1}}(x, y)$ и $\delta L_{P_{cl2}}(x, y)$ при $y = \text{const}$ (0,5; 1,0; 1,5 мм) для шага z_l , равного 32 мм (рис. 5.2, а) и 26 мм (рис. 5.2, б). При этом расчёт ФВ осуществлялся по формуле:

$$\delta L_{P_{cl}} = \frac{\Delta L_{P_{cl}}}{L_{ЧЭ, \infty}} \cdot 100\%,$$

где $L_{ЧЭ, \infty}$ — эквивалентная индуктивность ЧЭ при отсутствии лопатки.

Из графиков следует, что с уменьшением шага z_l (от 32 до 26 мм) влияние соседних лопаток возрастает в несколько раз, причём это влияние тем больше, чем меньше РЗ (y). Вместе с тем, $\delta L_{P_{cl}}$ не превышает 0,03%.

Как уже отмечалось, эквивалентная индуктивность ЧЭ при отсутствии лопаток (т.е. при $z_l \rightarrow \infty$) постоянна во времени и, в соответствии с рис. 5.1, в, имеет наибольшее значение ($3,657 \cdot 10^{-9}$ Гн). Соседние лопатки оказывают влияние не только на информативные значения эквивалентных индуктивностей рабочих ЧЭ, но и

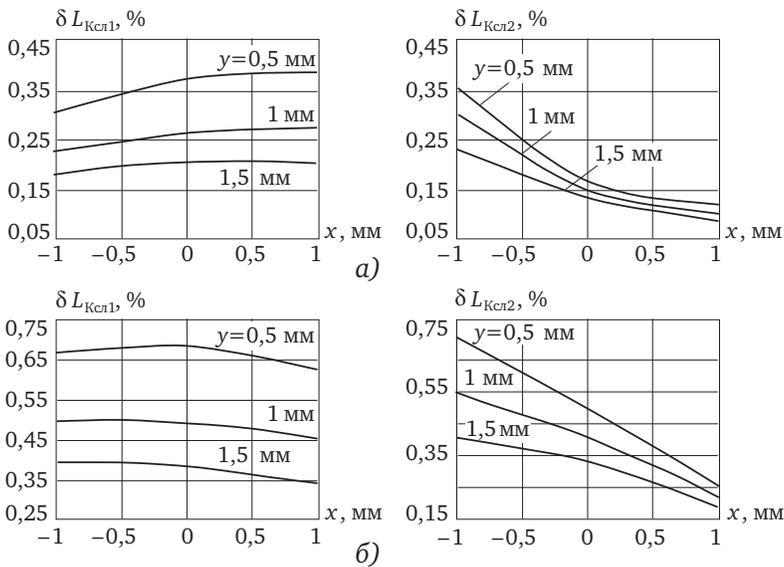


Рис. 5.4. Семейства ФВ соседних лопаток на компенсационные ЧЭ (*meth 1*) $\delta L_{Kcl1}(x, y)$ и $\delta L_{Kcl2}(x, y)$ при:
 а — $z_n = 32$ мм; б — $z_n = 26$ мм

на индуктивности ЧЭ, выполняющих компенсационные функции. На рис. 5.3 представлены результаты моделирования семейств ФП ($L_{ЧЭ1}^3(x, y)$ и $L_{ЧЭ2}^3(x, y)$), полученные для компенсационных ЧЭ. Поскольку ЧЭ-К, как и ЧЭ-Р, через СТ включены в общую ИЦ, то в процессе моделирования ФП фиксация эквивалентных индуктивностей ЧЭ-К производится при таких значениях координаты z , которым соответствуют минимумы информативных значений эквивалентных индуктивностей ЧЭ-Р. При этом ЧЭ₁-К в ИЦ функционирует в паре с ЧЭ₂-Р, а ЧЭ₂-К — в паре с ЧЭ₁-Р.

Из графиков следует, что под влиянием соседних лопаток индуктивность компенсационных ЧЭ утрачивает своё постоянство и становится зависимой как от координат смещений торцов лопаток (x и y), так и от шага z_n . Однако большая часть значений эквивалентных индуктивностей компенсационных ЧЭ в семействе ФП (рис. 5.3) по-прежнему превышает все возможные значения эквивалентных индуктивностей семейства ФП рабочих ЧЭ на рис. 2.16.

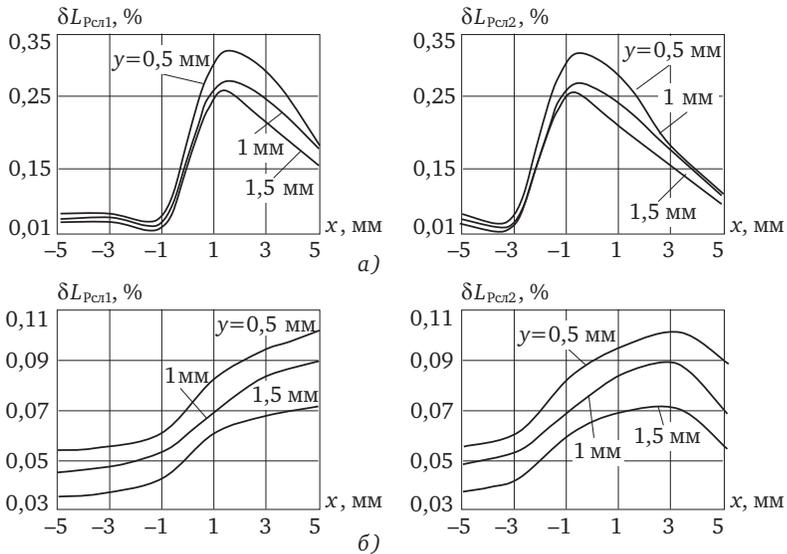


Рис. 5.5. ФВ соседних лопаток на рабочие ЧЭ $\delta L_{Pсл1}(x, y)$ и $\delta L_{Pсл2}(x, y)$ (meth 2):

а — при $z_d = 32$ мм; б — $z_d = 26$ мм

Сравнение ФВ соседних лопаток на компенсационные ЧЭ, вычисленные аналогично ФВ соседних лопаток на рабочие ЧЭ по формуле

$$\delta L_{Kсл} = \frac{\Delta L_{Kсл}}{L_{ЧЭ, \infty}} \cdot 100\%$$

и с учётом рис. 5.1, в, показывают многократное превышение $\delta L_{Kсл}$ над $\delta L_{Pсл}$ (величина $\delta L_{Kсл}$ достигает 0,75% при уменьшении z_d до 26 мм, рис. 5.4).

Учитывая суммарное действие рабочего и компенсационного ЧЭ в дифференциальной ИЦ, можно ожидать значительного увеличения вклада компенсационного ЧЭ за счёт соседних лопаток и его доминирующего влияния на ФП ИЦ.

Для топологии размещения ЧЭ₁ и ЧЭ₂ согласно meth 2 (см. рис. 1.6) семейства ФП ЧЭ₁ и ЧЭ₂ при $z_d \rightarrow \infty$ приведены на рис. 2.23. ФВ $\delta L_{Pсл1}(x, y)$ и $\delta L_{Pсл2}(x, y)$ при $y = \text{const}$ (0,5; 1,0; 1,5 мм) представлены на рис. 5.5 для шага $z_d = 32$ мм (а) и $z_d = 26$ мм (б).

Как и в случае с meth 1, влияние соседних лопаток возрастает в несколько раз с уменьшением шага z_d (от 32 до 26 мм) и РЗ (y) (от 1,5

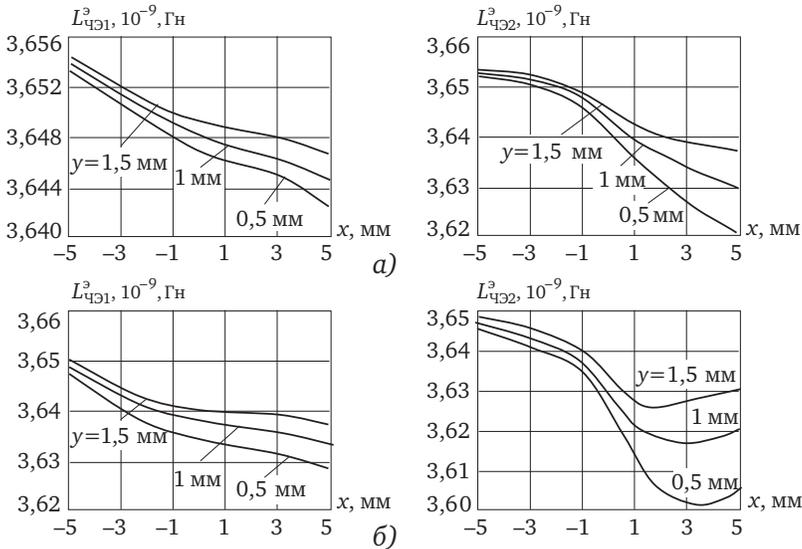


Рис. 5.6. Семейства ФП компенсационных ЧЭ при наличии соседних лопаток, установленных с шагом $z_L = 32$ мм (а) и $z_L = 26$ мм (б) (ЧЭ₁-К функционирует в паре с ЧЭ₂-Р, а ЧЭ₂-К — с ЧЭ₁-Р) (*meth 2*)

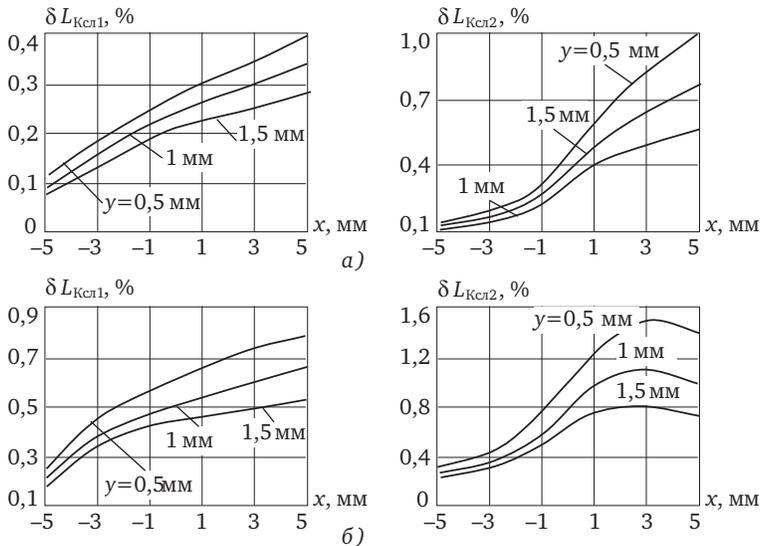


Рис. 5.7. Семейства ФВ соседних лопаток на компенсационные ЧЭ $\delta L_{Ксл1}(x, y)$ и $\delta L_{Ксл2}(x, y)$ (*meth 2*) при:
 а — $z_L = 32$ мм; б — $z_L = 26$ мм

до 0,5 мм). При этом максимальное значение $\delta L_{P_{сл1}}$ не превышает 0,1%, что примерно в 3 раза больше, чем при *meth 1*. Таким образом, повышение чувствительности к РЗ, достигнутое при использовании *meth 2* (подробнее в разделе 2), сопровождается увеличением влияния соседних лопаток. В характере изменений графиков на рис. 5.5 по сравнению с графиками на рис. 5.2 наблюдается большее число перегибов ФВ, что связано с более высокой степенью кривизны поверхностей в головной части лопаток, где, в соответствии с *meth 2*, размещены ЧЭ датчиков.

Семейства ФП ($L_{ЧЭ1}^3(x, y)$ и $L_{ЧЭ2}^3(x, y)$), полученные для компенсационных ЧЭ, показаны на рис. 5.6. Как и в экспериментах первой серии, под влиянием соседних лопаток индуктивность компенсационных ЧЭ становится зависимой как от координат смещений торцов лопаток (x и y), так и от шага $z_{л}$. Однако значения эквивалентных индуктивностей компенсационных ЧЭ в семействе ФП (рис. 5.6) по-прежнему превышают все возможные значения эквивалентных индуктивностей семейства ФП рабочих ЧЭ на рис. 2.23.

ФВ соседних лопаток на ЧЭ компенсационного ОВТД представлены на рис. 5.7. Величина $\delta L_{Ксл}$ достигает 1,5% при уменьшении $z_{л}$ до 26 мм, что вдвое больше максимального значения $\delta L_{Ксл}$ при использовании *meth 1*. Доминирующее влияние компенсационного ЧЭ на ФП ИЦ, как и в *meth 1*, сохраняется.

5.1.2. Исследование влияния соседних лопаток на выходные коды измерительной цепи

В модели ИЦ, описание которой приведено в разделе 3, оба датчика могут быть представлены переменными во времени эквивалентными индуктивностями первичных обмоток СТ. При этом $L_{ЧЭ}^3(t)$ определяется в результате моделирования ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки. Однако в процессе моделирования ИЦ в разделе 3 не учитывалось влияние соседних лопаток и значения эквивалентных индуктивностей ЧЭ, выполняющих компенсационные функции, принимались постоянными во времени, равными $L_{ЧЭ, \infty}^3$.

В вычислительных экспериментах, проведенных в настоящем разделе, исследования семейств ФП ИЦ ($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$) осуществлялись с учётом влияния соседних лопаток как на рабочие, так и на компенсационные ЧЭ, т.е. эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ рабочего и компенсационного датчиков представлены

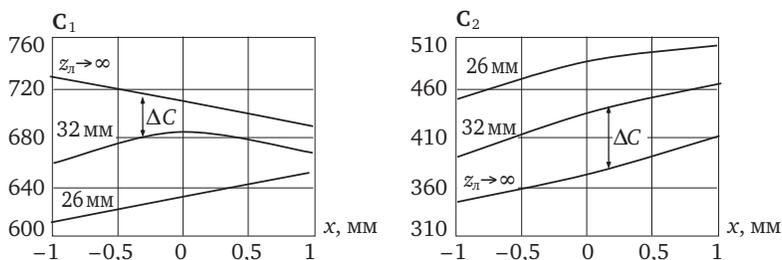


Рис. 5.8. Влияние шага лопаток (z_l) на характеристики $C_1(x)$ и $C_2(x)$ при $y = 0,5$ мм (*meth 1*)

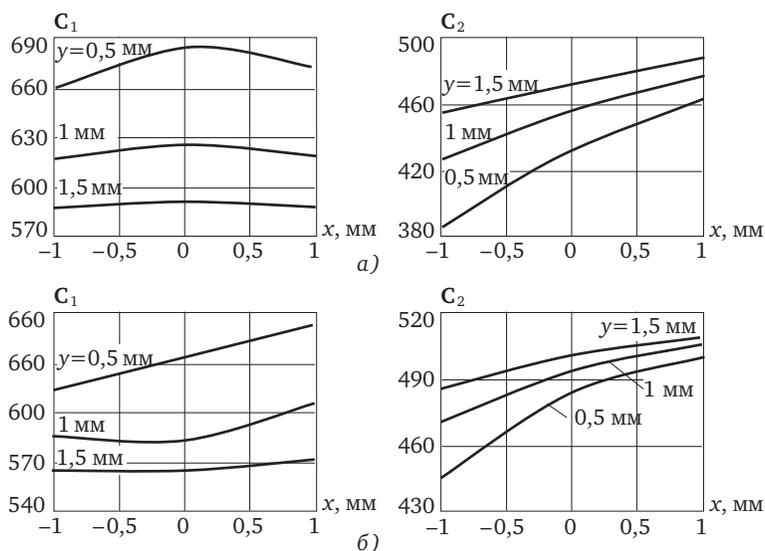


Рис. 5.9. Семейства ФП ИЦ $C_1(x, y)$, $C_2(x, y)$ с учетом влияния соседних лопаток при (*meth 1*):
а — $z_l = 32$ мм; б — $z_l = 26$ мм

как функции времени. При этом предполагалось использование обоих методов (*meth 1* и *meth 2*), но в одном варианте ИЦ (ИЦ-НС).

Результаты моделирования ФП и ФВ соседних лопаток на выходные коды ИЦ. Семейства ФП ИЦ-НС $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ для *meth 1* без учёта влияния соседних лопаток ($z_l \rightarrow \infty$) представлены на рис. 3.18, а на рис. 5.8 показано влияние шага установки лопаток только на характеристики $C_1(x)$ и $C_2(x)$ при $y = 0,5$ мм (для шага

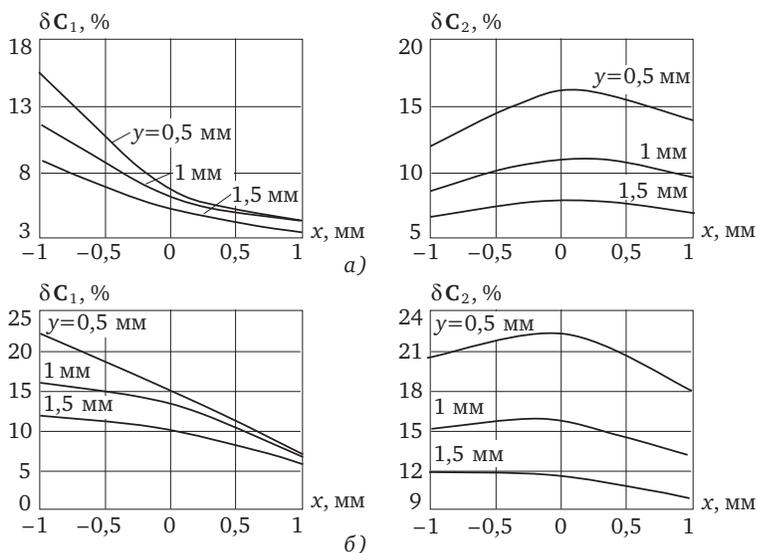


Рис. 5.10. ФВ соседних лопаток $\delta C_1(x, y)$, $\delta C_2(x, y)$ (*meth 1*) при:
 а — $z_n = 32 \text{ мм}$; б — $z_n = 26 \text{ мм}$

$z_n \rightarrow \infty$, а также 32 и 26 мм), на которых видны существенные изменения кодов, связанные с влиянием соседних лопаток, достигающие нескольких сотен единиц (C_1 в сторону понижения, C_2 в сторону повышения). При этом характер изменений $C_1(x)$ меняется с падающего на возрастающий.

В полном объеме семейства ФП ИЦ представлены на рис. 5.9 при z_n , равном 32 (а) и 26 (б) мм, а на основе полученных здесь данных построены семейства ФВ ($\delta C_1(x, y)$ и $\delta C_2(x, y)$) соседних лопаток ($\delta C = (\Delta C / \Delta C_{\max}) \cdot 100\%$, где ΔC — изменения кодов из-за влияния соседних лопаток при выбранном значении y (изменения ΔC при $y = 0,5 \text{ мм}$ показаны на рис. 5.8); ΔC_{\max} — диапазоны изменений кодов C_1 и C_2 (в рассматриваемой ИЦ ΔC_{\max} составляет 512 единиц).

Семейства ФВ соседних лопаток изображены на рис. 5.10 и демонстрируют весьма значительные изменения $\delta C_1(x, y)$ и $\delta C_2(x, y)$, которые достигают 27% при шаге 26 мм. При этом следует подчеркнуть, что характер изменений ФВ определяют компенсационные ЧЭ ($\delta C_1(x, y)$ идентичны $\delta L_{\text{Кел}2}(x, y)$, а $\delta C_2(x, y)$ — соответственно $\delta L_{\text{Кел}1}(x, y)$; ($\delta L_{\text{Кел}1}(x, y)$ и $\delta L_{\text{Кел}2}(x, y)$ представлены на рис. 5.4)).

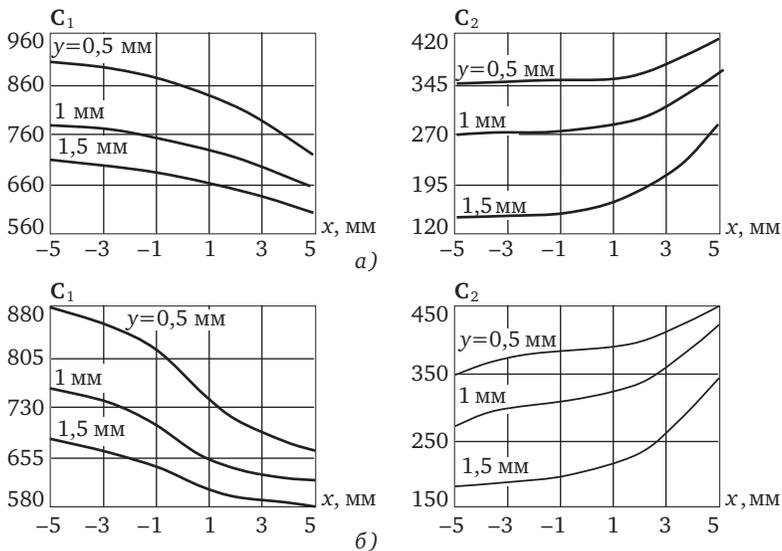


Рис. 5.11. Семейства ФП ИЦ $C_1(x, y)$, $C_2(x, y)$ с учетом влияния соседних лопаток (*meth 2*) при:
 а — $z_d = 32$ мм; б — $z_d = 26$ мм

Возвращаясь к семействам ФП ИЦ (рис. 5.9, а), в которых учтено влияние соседних лопаток, необходимо отметить, что при z_d , равном 32 мм, наблюдается немонотонный характер $C_1(x, y)$ и наличие экстремумов при всех значениях y (0,5; 1,0; 1,5 мм) (без учёта соседних лопаток оба семейства ФП ($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$) — монотонны. Это означает, что при решении системы уравнений, в которой используются семейства ФП, нельзя применять метод Ньютона и реализующие его алгоритмы. Решение возможно, если воспользоваться алгоритмом, рассмотренном в разделе 4.4.

В последующих результатах вычислительных экспериментов предполагалось использование *meth 2*. Семейства ФП ИЦ с учётом соседних лопаток при z_d , равном 32 (а) и 26 мм (б), представлены на рис. 5.11, а при $z_d \rightarrow \infty$ — на рис. 3.19. Изменения кодов, связанные с изменением шага установки лопаток, как и в предыдущих экспериментах, достигают нескольких сотен единиц (C_1 в сторону понижения, C_2 в сторону повышения). При этом падающий характер изменений $C_1(x)$ становится более выраженным.

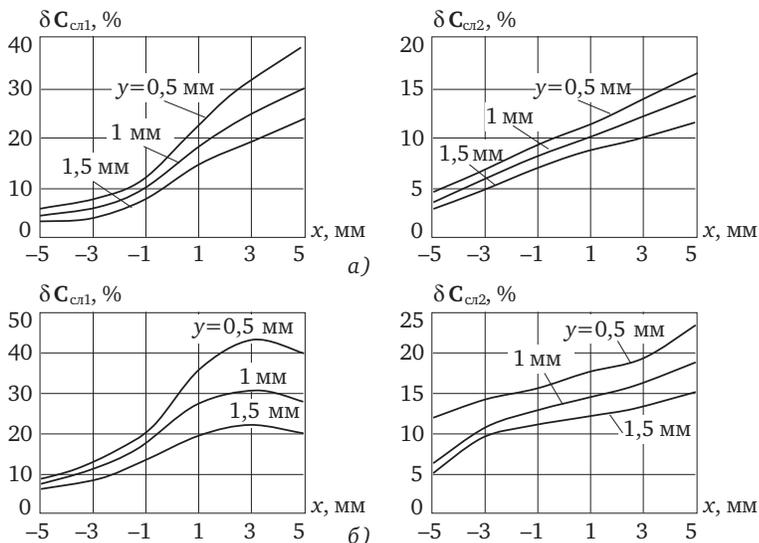


Рис. 5.12. Семейства ФВ соседних лопаток ИЦ

$\delta C_{сн1}(x, y)$ и $\delta C_{сн2}(x, y)$ (*meth 2*) при:

$a - z_n = 32$ мм; $b - z_n = 26$ мм

Семейства ФВ ($\delta C_1(x, y)$ и $\delta C_2(x, y)$) получены по той же формуле и приведены на рис. 5.12. Максимальные изменения $\delta C_1(x, y)$ и $\delta C_2(x, y)$ (52% при шаге 26 мм) примерно вдвое превышают аналогичные значения, полученные для *meth 1*, что соответствует соотношению значений ФВ компенсационного датчика для обоих методов. Вместе с тем, преимущество *meth 2* по чувствительности к РЗ в сравнении с *meth 1* сохраняется.

Защитные меры по уменьшению влияния соседних лопаток и возможных погрешностей. Возвращаясь к количественной оценке ФВ в виде зависимостей $\delta C_{сн1}(x, y)$ и $\delta C_{сн2}(x, y)$, следует отметить, что они получены с помощью существенно упрощенной модели ЭМВ ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками. В действительности в реальной конструкции ОВТД (см. рис. 1.1) распределение тока, протекающего по ЧЭ, в обоих ТВ имеет весьма сложный характер, причем один из ТВ оказывает экранирующее действие по отношению к соседним лопаткам, уменьшая их влияние.

Кроме того, крепежная арматура ОВТД, выполненная из того же материала, что и датчик, экранирует большую часть внешней по-

верхности ТВ от соседних лопаток. Чтобы получить более корректные количественные оценки экранирующего эффекта ТВ и крепежной арматуры, необходимы модели распределения тока в ЧЭ и ТВ, а также ЭМВ этих токов с крепежной арматурой, контролируемой и соседними лопатками. Работы по созданию таких моделей ведутся, но для получения результатов требуется время.

Разумеется, количественная оценка влияния соседних лопаток возможна и путем экспериментальных исследований. Если в ходе таких исследований, несмотря на принятые конструктивные меры, выявлено влияние соседних лопаток, которое приводит к недопустимым погрешностям, то их существенного уменьшения можно достигнуть путем замены существующей методики градуировки на вновь разработанную.

В отличие от известной, в предлагаемой методике градуировки предусмотрено использование не одной, а пяти лопаток, применяемых в турбине. Лопатки устанавливаются на общем основании с тем же шагом в линейном выражении, что и на рабочем колесе реальной турбины. В сущности, такая конструкция имитирует фрагмент рабочего колеса, а в совокупности с элементами конструкции, позволяющими осуществлять трёхкоординатное смещение имитатора (в направлении осей X , Y , Z системы отсчёта), измерительным инструментом — индикаторами перемещений часового типа с требуемой разрешающей способностью (до 0,01 мм), а также РК из двух ОВТД, ЧЭ которых размещены в соответствии с требованиями *meth 1* и *meth 2* по отношению к имитатору, она обеспечивает получение семейства ГХ с учётом соседних лопаток.

Сравнение результатов экспериментальных исследований, проведённых по существующей и предлагаемой методикам получения ГХ, обеспечивает количественную оценку эффективности последней, и это означает реальную возможность уменьшения влияния соседних лопаток и связанных с ним погрешностей.

5.2. Влияние температуры и уменьшение связанных с ней погрешностей

С помощью моделирования исследуется влияние температуры среды в газоздушном тракте на эквивалентные индуктивности ЧЭ, первичных обмоток СТ ОВТД в составе РК и на выходные коды

ИЦ. При этом во избежание нарушения в режиме работы системы измерений производится проверка размещения экстремальных значений кодов в соответствующих и заранее установленных интервалах. Исследуются погрешности измерения температуры ЧЭ датчика в канале термокоррекции системы измерения и предлагается метод её уменьшения.

5.2.1. Исследования влияния температуры на выходные коды измерительной цепи

Предполагается, что воздействия среды в газозооудном тракте турбины приводят к изменениям температуры лопатки и ОВТД в пределах от нормальной (20 °С) до 1000 °С. Предполагается также, что изменения температуры в указанных пределах вызывают соответствующие изменения геометрических и электрических параметров КЭ во всех частях лопатки, т.е. размеров КЭ (основания и высоты прямоугольника) и размеров элементов конструкции ОВТД (ЧЭ, ТВ, ОВ), а также удельного сопротивления стали, применяемой в лопатках и датчиках. При этом для расчета линейных размеров и удельного сопротивления в зависимости от температуры используются формулы:

$$l_{\Theta} = l_{20}(1 + \alpha_{\Theta}\Delta\Theta),$$

$$\rho_{\Theta} = \rho_{20}(1 + \beta_{\Theta}\Delta\Theta),$$

где l_{20} и ρ_{20} — линейный размер и удельное сопротивление при температуре $\Theta = 20$ °С; α_{Θ} и β_{Θ} — температурные коэффициенты расширения и сопротивления; $\Delta\Theta = (\Theta - 20)$ — изменение температуры от 20 до Θ °С.

Согласно [54] для выбранного материала лопатки и датчика $\alpha_{\Theta} = 0,0000129$ 1/°С, $\beta_{\Theta} = 0,0009731$ 1/°С. Представляется очевидным, что при температурных воздействиях изменения линейных размеров КЭ приводят к изменениям размеров лопатки по всем направлениям координатных осей системы отсчета *OXYZ*. При этом расстояние от ЧЭ до торцевой части лопатки, т.е. РЗ, предполагается неизменным.

Для исследования влияния температуры на выходные коды ИЦ применяется модель, исходными данными для которой являются результаты моделирования ЭМВ ЧЭ, выполняющего рабочие функции, и лопатки. И если эквивалентная индуктивность рабочего ЧЭ

изменяется во времени, то индуктивность компенсационного ЧЭ остается постоянной.

Необходимо подчеркнуть, что остальные исходные данные в вычислительных экспериментах сохраняются теми же, что и в разделах 2, 3, 5.1.

Вместе с тем приходится констатировать, что при изложенном подходе к исследованиям остаются неизученными температурные воздействия на элементы конструкций ОВТД — ЧЭ, ТВ и СТ. Представляется очевидным, что при импульсном питании ИЦ с ОВТД вихревые токи возникают не только в лопатке, но и в самом ЧЭ, а также в ТВ и ОВ СТ. Можно утверждать, что при наличии модели ОВТД как единой конструкции, в которой интегрированы все перечисленные элементы (ЧЭ, ТВ, ОВ СТ), механизм влияния вихревых токов на эквивалентную индуктивность первичной обмотки СТ был бы аналогичен действию вихревых токов в лопатке на КЧЭ и на его эквивалентную индуктивность. Но это означает, что температурные воздействия на ОВТД так или иначе вызывают температурные изменения размеров и удельного сопротивления материала ЧЭ, ТВ, ОВ СТ, а в конечном счёте и эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ. Однако разработка такой модели на сегодняшний день не завершена. Поэтому количественные оценки влияния температуры были получены экспериментально путём измерения индуктивности первичной обмотки СТ ОВТД, которая в интегрированном виде отражает температурные изменения размеров и удельного сопротивления материала всех элементов конструкции ОВТД.

Эксперимент проводился при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика. Полученные результаты выражаются в процентах от индуктивности первичной обмотки СТ при нормальной температуре. Что же касается температурных изменений эквивалентного сопротивления первичной обмотки, которое также определяется экспериментально, то они вычисляются по температурному коэффициенту удельного сопротивления материала в диапазоне температур от 20 до 1000 °С.

Основная задача исследований в настоящем разделе — получение ФП в виде зависимостей кодов на выходе ИЦ от координат смещений и температуры (до $\Theta = 1000$ °С), а затем и ФВ температуры в предположении использования сначала *meth 1* и далее *meth 2*.

Поскольку семейства ФП при нормальной температуре ($\Theta = 20^\circ\text{C}$) известны (по результатам исследований, см. раздел 3), то по их разнице можно определить и семейства ФВ температуры.

Вместе с тем следует отметить, что результаты моделирования (изменения кода на выходе ИЦ) определяются суммарным действием нескольких составляющих, в число которых входят размеры и удельное сопротивление торцевой части лопатки и элементов конструкции ОВТД, причем степень влияния каждой из перечисленных составляющих может отличаться более чем на порядок.

В то же время процесс моделирования, фактически состоящий из двух этапов (ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки и собственно ИЦ), маскирует вклады отдельных составляющих, что затрудняет поиск и реализацию способов уменьшения влияния температурных воздействий, включающих такие способы, которые обеспечивают снижение вклада наиболее значимой составляющей. Поэтому планируемыми вычислительными экспериментами на модели ИЦ предшествуют описания результатов приближенных оценок влияния температуры (по отдельным составляющим) на эквивалентные индуктивности датчиков, а также упрощенного анализа ИЦ, обеспечивающего количественную оценку вклада отдельных составляющих.

Результаты приближенных оценок влияния температуры на эквивалентные индуктивности ЧЭ и первичных обмоток СТ ОВТД. Еще на этапе предварительных исследований были получены семейства ФВ температуры (в диапазоне от 20 до 1000 °C) в виде зависимостей $\delta L_{\text{ЧЭ}1,\Theta}^3(x,y)$ и $\delta L_{\text{ЧЭ}2,\Theta}^3(x,y)$, расчеты которых подобны вычислениям ФВ соседних лопаток (раздел 5.1)¹. Однако подробное описание проведенных вычислительных экспериментов здесь не приводится, но в ограниченном виде оно представлено максимальными значениями ФВ и их составляющими.

Температурные воздействия на лопатку вызывают изменения удельного сопротивления (ρ) материала лопатки и соответствующие изменения сопротивлений в контурах КЭ, что приводит к изменениям эквивалентных индуктивностей ЧЭ также в сторону увеличения. Максимальные значения последующих количественных

¹ Расчет ФВ выполняется по формуле $\delta L_{\text{ЧЭ},\Theta}^3 = (\Delta L_{\text{ЧЭ},\Theta}^3 / \Delta L_{\text{ЧЭ},\infty}^3) \cdot 100\%$, где $\Delta L_{\text{ЧЭ},\Theta}^3$ — изменение информативного значения эквивалентных индуктивностей от температуры, а $\Delta L_{\text{ЧЭ},\infty}^3$ — эквивалентная индуктивность ЧЭ ОВТД при нормальной температуре (20 °C) и отсутствии лопатки в зоне чувствительности ЧЭ ($y \rightarrow \infty$).

оценок, полученных на модели ЭМВ ЧЭ и лопатки, в предположении использования *meth 1* составляют +0,28% для ЧЭ₁ и +0,22% для ЧЭ₂. Кроме того, температурные воздействия на лопатку вызывают изменения линейных размеров КЭ и, как следствие, размеров лопатки в направлении осей X, Y, Z. При этом изменения индуктивности происходят в сторону увеличения при температурной деформации по оси Y, составляя +0,002% для ЧЭ₁ и +0,003% для ЧЭ₂. И, напротив, в сторону уменьшения при деформациях в направлении осей X и Z (-0,02% для ЧЭ₁ и -0,016% для ЧЭ₂).

В итоге влияние температуры на эквивалентные индуктивности ЧЭ будет определяться ее суммарным (с учетом знака) действием на лопатку с учетом изменений её размеров и удельного сопротивления. Для ЧЭ₁ эта сумма составляет +0,28%(ρ) + 0,002%(γ) - 0,02%(x, z) ≈ +0,262%, а для ЧЭ₂: +0,22%(ρ) + 0,003%(γ) - 0,016%(x, z) ≈ +0,207%.

Как уже отмечалось, температурные воздействия на ОВТД исследовались экспериментально с помощью специально изготовленного оборудования и комплекта измерительных средств, обслуживающих эксперимент (их подробное описание приведено в работе [51] и разделе 5.2.2). Чтобы избежать влияния температурных воздействий на СТ и связанных с ними изменений магнитной проницаемости ферритового сердечника, осуществлялось принудительное охлаждение СТ. При этом температура ЧЭ составляла не менее 400 °С.

Полученное изменение индуктивности первичной обмотки СТ, фиксированное прибором E7-12 на частоте 1 МГц, было использовано для оценки её изменений при температуре 1000 °С (в предположении линейной связи индуктивности и температуры). Тогда при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика ФВ температуры на эквивалентные индуктивности первичной обмотки СТ составит 4,9%¹, причем изменения индуктивности происходят в сторону увеличения².

Для оценки суммарного воздействия температуры на ОВТД и лопатку семейства ФП, полученные с помощью модели ЭМВ ЧЭ₁ и

¹ Указанная ФВ температуры получена как отношение изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ ОВТД при увеличении температуры к значению эквивалентной индуктивности, полученному при нормальной температуре.

² Эти результаты можно использовать и как ФВ температуры на индуктивность первичной обмотки СТ ОВТД, выполняющего в ИЦ не только компенсационные, но и рабочие функции (если учтено влияние температуры на лопатку).

ЧЭ₂ с контролируемой лопаткой (с учетом влияния температуры $\Theta = 1000$ °С), необходимо трансформировать по формуле (2.28) в семейства ФП первичных обмоток СТ ОВТД. При этом изменения индуктивности первичной обмотки СТ происходят (как и индуктивности ЧЭ) в сторону увеличения при температурной деформации лопатки по оси Y, составляя +0,00067% (ОВТД₁) и +0,001% (ОВТД₂), и в сторону уменьшения при деформациях в направлении осей X и Z (-0,0067% (ОВТД₁) и -0,0053% (ОВТД₂)). При этом значения ФВ уменьшились примерно втрое по сравнению с аналогичными ФВ температуры на эквивалентные индуктивности ЧЭ.

Влияние температуры на эквивалентные индуктивности первичных обмоток СТ ОВТД (выполняющего в ИЦ рабочие функции) будет определяться её суммарным действием на ОВТД и лопатку с учетом изменений размеров лопатки и удельного сопротивления. Для ОВТД₁ эта сумма составляет +4,9% + 0,093%(ρ) + 0,00067%(γ) - 0,0067%(x, z) ≈ +4,987%, а для ОВТД₂: +4,9% + 0,073%(ρ) + 0,001%(γ) - 0,0053%(x, z) ≈ +4,9687%.

Таким образом, в результате температурных воздействий на ОВТД и лопатку эквивалентная индуктивность возрастает в обоих ОВТД, выполняющих в ИЦ рабочие функции, причем это увеличение незначительно больше у ОВТД₁, чем у ОВТД₂, что связано с особенностями размещения ЧЭ₂ относительно ЧЭ₁ и геометрического центра лопатки. Вместе с тем, как уже отмечалось, температурные изменения индуктивности первичной обмотки СТ ОВТД, выполняющих компенсационные функции, также происходят в сторону увеличения и составляют 4,9%.

Подобные максимальные значения количественных оценок отдельных составляющих в предположении использования *meth 2* получены на той же модели. Изменение индуктивности ЧЭ при изменении удельного сопротивления и линейных размеров лопатки при повышении температуры до 1000 °С составляет для ЧЭ₁: +0,47%(ρ) + 0,0027%(γ) - 0,026%(x, z) ≈ +0,4467%, а для ЧЭ₂: +0,47%(ρ) + 0,0029%(γ) - 0,013%(x, z) ≈ +0,4599%.

Тогда суммарное изменение индуктивности первичной обмотки СТ ОВТД при влиянии температуры на лопатку и датчик составит для ОВТД₁: +4,9% + 0,16%(ρ) + 0,0009%(γ) - 0,0087%(x, z) ≈ +5,0519%; а для ОВТД₂: +4,9% + 0,16%(ρ) + 0,0009%(γ) - 0,004%(x, z) ≈ +5,05697%.

Полученные результаты позволяют дать приближенную оценку влияния температуры на выходные напряжения и коды ИЦ. Далее приводится упрощенный анализ ИЦ-НС.

Упрощенный анализ ИЦ и влияния температуры на цифровой код. Для входной части ИЦ (см. раздел 3) справедливы выражения

$$L_{11}^3 \frac{di_1}{dt} = E \quad \text{или} \quad L_{11}^3 \frac{\Delta i_1}{\Delta t} \approx E \quad \text{и} \quad L_{12}^3 \frac{di_2}{dt} = E \quad \text{или} \quad L_{12}^3 \frac{\Delta i_2}{\Delta t} \approx E.$$

С учетом этого можно записать

$$\Delta i_1 = \frac{E}{L_{11}^3} \Delta t, \quad \Delta i_2 = \frac{E}{L_{12}^3} \Delta t,$$

а напряжения на выходах ПТН

$$U_1 = \Delta i_1 R = ER \Delta t \frac{1}{L_{11}^3}, \quad U_2 = \Delta i_2 R = ER \Delta t \frac{1}{L_{12}^3},$$

причем разностное напряжение с выходов ПТН¹

$$\Delta U = U_1 - U_2 = ER \Delta t \left(\frac{1}{L_{11}^3} - \frac{1}{L_{12}^3} \right).$$

Полагая отсутствие лопатки в зонах чувствительности обоих ЧЭ, $L_{11}^3 = L_0$ и $L_{12}^3 = L_0 + L_d$, а

$$\Delta U = ER \Delta t \frac{L_d}{L_0(L_0 + L_d)}.$$

Судя по временным диаграммам на рис. 3.3, напряжение ΔU имеет пилообразную форму, и его амплитудное значение после усиления МУс составляет 0,5 В на входе десятиразрядного АЦП, что соответствует коду $C_0 = 512$.

При этом в реальных ИЦ-НС катушка с индуктивностью L_d как самостоятельный элемент схемы не существует, а индуктивность ОВТД₂ (L_{12}^3) подбирается больше индуктивности ОВТД₁ (L_{11}^3) на величину L_d , примерно равную $0,01L_0$. Это связано с тем, что с появлением лопатки в зоне чувствительности максимально возможные изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ остаются в пределах 1% от L_0 (см. раздел 3).

¹ Сопротивление \bar{R} — это упрощенная запись сопротивления обратной связи ПТН R_1 и R_2 (см. рис. 3.1, 3.3).

Далее предполагается, что лопатка по-прежнему отсутствует как в зоне чувствительности ЧЭ₁, так и ЧЭ₂, но произошли температурные изменения в окружающей ЧЭ среде (от нормальной до 1000 °С), что, в свою очередь, вызывает изменения эквивалентных индуктивностей L_{11}^3 , L_{12}^3 (ΔL_{\ominus}) и изменения индуктивности $L_{\text{д}}$ ($\Delta L_{\text{д},\ominus}$): $L_{11}^3 = L_0 + \Delta L_{\ominus}$, $L_{12}^3 = L_0 + \Delta L_{\ominus} + L_{\text{д}} + \Delta L_{\text{д},\ominus}$. Тогда

$$\Delta U = E \frac{\Delta t}{\tau_0} \cdot \frac{L_{\text{д}} \left(1 + \frac{\Delta L_{\text{д},\ominus}}{L_{\text{д}}} \right)}{L_0 \left(1 + \frac{\Delta L_{\ominus}}{L_0} \right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta L_{\ominus}}{L_0} + \frac{L_{\text{д}}}{L_0} + \frac{\Delta L_{\text{д},\ominus}}{L_0} \right)},$$

где $\tau_0 = L_0/R$.

Подбором сопротивления R можно добиться равенства Δt и τ_0 , а учитывая, что $(\Delta L_{\text{д},\ominus}/L_{\text{д}}) = (\Delta L_{\ominus}/L_0)$ и $\Delta L_{\text{д},\ominus}/L_0$ значительно меньше остальных слагаемых второго множителя в знаменателе, рассматриваемое выражение примет вид:

$$\Delta U \approx E \frac{L_{\text{д}}}{L_0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta L_{\ominus}}{L_0} \right) + \frac{L_{\text{д}}}{L_0}}.$$

Поскольку при отсутствии температурных воздействий (в нормальных условиях) $\Delta L_{\ominus}/L_0 = 0$, то и

$$\Delta U_0 \approx E \frac{L_{\text{д}}}{L_0} \frac{1}{1 + \frac{L_{\text{д}}}{L_0}},$$

причем полученному значению ΔU_0 (на выходах ПТН) соответствует напряжение на выходе МУС

$$\Delta U_{\text{м},0} \approx k_{\text{м}} E \frac{L_{\text{д}}}{L_0} \frac{1}{1 + \frac{L_{\text{д}}}{L_0}},$$

где $k_{\text{м}}$ — коэффициент масштабирования. В свою очередь напряжению $\Delta U_{\text{м},0}$ соответствует цифровой код на выходе ИЦ, который, пренебрегая отношением $\Delta L_{\text{д}}/L_0$ в знаменателе, можно записать в виде $C_0 \approx k_{\text{с}} E k_{\text{м}} (L_{\text{д}}/L_0)$, где $k_{\text{с}}$ — коэффициент с размерностью [1/В], причем $C_0 = 512$. С повышением температуры первое слагаемое (в скоб-

ках) в знаменателе увеличится, а напряжения с выходов ПТН, МУС и код C уменьшаются ($\Delta U < \Delta U_0$; $\Delta U_M < \Delta U_{M,0}$; $C < C_0$). По результатам предварительных исследований (см. выше) $\Delta L_\Theta/L_0 = 0,049$ (в процентном выражении 4,9%), и это означает, что напряжения ΔU , ΔU_M и код C будут уменьшаться на ту же величину. В этой связи могут возникнуть трудности в идентификации экстремальных значений кодов C_1 (ОВТД₁) и C_2 (ОВТД₂), которые не должны выходить за пределы 1024...512 и 512...0 соответственно. Поэтому представляется целесообразным применение коррекции возможных изменений кода, вызванных температурными изменениями эквивалентных индуктивностей ΔL_Θ . Возможны два способа коррекции — алгоритмический и аппаратный.

Первый способ предусматривает умножение кода C на безразмерное число, представляемое

$$k_\Theta = \left(1 + \frac{\Delta L_\Theta}{L_0} + \frac{L_d}{L_0} \right),$$

и определяемое знаменателем, что обеспечивает постоянство кода ($C = C_0$) в условиях температурных воздействий на ОВТД (при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчиков). При этом отношение $\Delta L_\Theta/L_0$ является текущим значением функции влияния температуры $\Delta L_\Theta/L_0 = \bar{f}(\Theta)$ при известных значениях Θ , полученных по результатам обработки в ПЭВМ данных с ТП, встроенных в ОВТД (после нормализации и аналого-цифрового преобразования).

Второй способ коррекции также предусматривает использование тех же ТП, устройств нормализации и аналого-цифрового преобразования, а также обработки данных в ПЭВМ (получение физических значений температуры) с последующим цифроаналоговым преобразованием (ЦАП). При таком способе осуществляется воздействие на напряжение питания ИЦ, когда с уменьшением ΔU_0 и соответствующего значения кода C , связанных с повышением температуры Θ , увеличивается напряжение питания на требуемую величину (ΔE). Тогда напряжение питания после коррекции $E_k = E + \Delta E$, где ΔE — регулируемая с помощью ЦАП составляющая напряжения питания, изменяющаяся в пределах от 0 до примерно 0,05E в зависимости от температуры¹.

¹ Более подробное описание способов уменьшения влияния температурных изменений эквивалентных индуктивностей приведено в заключительной части настоящего раздела.

В последующем анализе предполагается наличие лопатки в зоне чувствительности сначала ЧЭ₁ (ЧЭ₁-Р, ЧЭ₂-К), а затем — в зоне чувствительности ЧЭ₂ (ЧЭ₂-Р, ЧЭ₁-К). При этом температурным воздействиям подвергаются как ОВТД₁ и ОВТД₂, так и лопатка. Кроме того, предполагается, что из двух способов коррекции температурных воздействий выбран второй, в соответствии с которым напряжение питания ИЦ-НС скорректировано и при температуре $\Theta = 1000^\circ\text{C}$ увеличено на $\Delta E = 0,049E$ ($E_k = 1,049E$). Предполагается также, что изменения эквивалентных индуктивностей, связанные с изменениями смещений торцов лопаток $\Delta L_{x,y}$ составляют около 0,45% от L_0 , а температурные изменения эквивалентных индуктивностей, связанные с лопаткой $\Delta L_{\ThetaЛ}$, определяются только температурными изменениями удельного сопротивления ρ материала лопатки, одинаковы для обоих датчиков и составляют около 0,16% от L_0 .

Пусть рабочие функции выполняет ЧЭ₁, а компенсационные ЧЭ₂. Тогда

$$L_{11}^3 = L_0 + \Delta L_{\Theta} - \Delta L_{x,y} + \Delta L_{\ThetaЛ};$$

$$L_{12}^3 = L_0 + \Delta L_{\Theta} + L_d + \Delta L_{d,\Theta};$$

$$\Delta U_M = E_k \frac{L_d}{L_0} k_M \frac{\left(1 + \frac{\Delta L_{d,\Theta}}{L_d}\right) + \frac{\Delta L_{x,y}}{L_d} - \frac{\Delta L_{\ThetaЛ}}{L_d}}{\left[\left(1 + \frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0}\right) - \frac{\Delta L_{x,y} + \Delta L_{\ThetaЛ}}{L_0} \right] \left(1 + \frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + \frac{L_d + \Delta L_{d,\Theta}}{L_0}\right)}.$$

Так как $\frac{\Delta L_{x,y}}{L_0}, \frac{\Delta L_{\ThetaЛ}}{L_0} \ll \frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0}, \frac{\Delta L_{d,\Theta}}{L_0} \ll \frac{L_d}{L_0}$, то

$$\Delta U_M = E_k \frac{L_d}{L_0} k_M \frac{\left(1 + \frac{\Delta L_{d,\Theta}}{L_d}\right) + \frac{\Delta L_{x,y}}{L_d} - \frac{\Delta L_{\ThetaЛ}}{L_d}}{\left(1 + \frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + \frac{L_d}{L_0}\right)}.$$

Поскольку температурные изменения $\Delta L_{д, \Theta}/L_{д}$, $\Delta L_{\Theta}/L_0$ компенсируются следящими за температурой изменениями напряжения питания $E_{к}$, то изменения $\Delta U_{м}$ будут определяться выражениями $\Delta L_{x,y}/L_{д}$, $\Delta L_{\Theta л}/L_{д}$. А потому и в кодах на выходе ИЦ будут две составляющие, одна из которых ($\Delta C_{x,y}$) зависит от $\Delta L_{x,y}/L_{д}$, вторая ($\Delta C_{\Theta л}$) — от $\Delta L_{\Theta л}/L_{д}$, причем с противоположными знаками: $C_1 = C_0 + \Delta C_{x,y} - \Delta C_{\Theta л}$.

Если рабочие функции выполняет ЧЭ₂, а компенсационные ЧЭ₁, то $L_{11}^{\text{э}} = L_0 + \Delta L_{\Theta}$, $L_{12}^{\text{э}} = L_0 + \Delta L_{\Theta} + L_{д} + \Delta L_{д, \Theta} - \Delta L_{x,y} + \Delta L_{\Theta л}$. Таким образом,

$$\Delta U_{м} = E_{к} \frac{L_{д}}{L_0} k_{м} \frac{\left(1 + \frac{\Delta L_{д, \Theta}}{L_{д}}\right) - \frac{\Delta L_{x,y}}{L_{д}} + \frac{\Delta L_{\Theta л}}{L_{д}}}{\left(1 + \frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta L_{\Theta}}{L_0} + \frac{L_{д}}{L_0}\right)},$$

$$а C_2 = C_0 - \Delta C_{x,y} + \Delta C_{\Theta л}.$$

Завершая подраздел и сравнивая выражения кодов C_1 и C_2 , можно констатировать различные по знаку изменения кодов, связанные со смещениями торцов лопаток ($\pm \Delta C_{x,y}$) и изменения кодов, связанные с температурой лопатки ($\mp \Delta C_{\Theta л}$). При этом величину $\Delta C_{\Theta л}$ можно считать соизмеримой с $\Delta C_{x,y}$, хотя применительно к обоим методам (*meth 1*, *meth 2*) $\Delta C_{\Theta л}$ примерно вдвое меньше $\Delta C_{x,y}$.

В то же время нельзя не отметить, что в представленном в настоящем подразделе приближенном анализе были приняты серьезные упрощающие допущения, в частности, в отношении к изменениям эквивалентных индуктивностей $\Delta L_{x,y}$, ΔL_{Θ} , $\Delta L_{\Theta л}$, которые считались равными для обоих датчиков, хотя в некоторых результатах предварительных исследований на моделях и экспериментальных данных наблюдаются заметные расхождения. Поэтому в результатах последующих вычислительных экспериментов на моделях ИЦ, исходными данными для которых являются результаты моделирования ЭМВ ЧЭ и лопатки, неравенства $\Delta C_{x,y}$ и $\Delta C_{\Theta л}$ в кодах C_1 и C_2 вполне ожидаемы.

Результаты моделирования. На рис. 5.13 представлены результаты моделирования ИЦ-НС — зависимости $C_1(x)$ и $C_2(x)$ при постоянной величине $y = 0,5$ мм и температуре $\Theta = 1000$ °С (для сравнения там приведены те же функции, полученные для нормальной

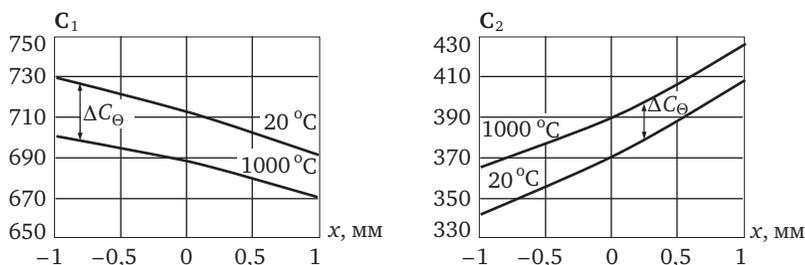


Рис. 5.13. Влияние изменения температуры на ФП $C_1(x)$ и $C_2(x)$ при $y = 0,5$ мм (*meth 1*)

температуры ($\Theta = 20^\circ\text{C}$). Предполагается, что в системе измерения используется *meth 1*, в процессе моделирования осуществляется коррекция напряжения питания ИЦ (E_k).

Из графиков $C_1(x)$ и $C_2(x)$ видно, что температурные изменения кодов по знаку соответствуют результатам приближенного анализа, но отличаются величиной. Это связано с превышением ФВ температуры лопатки на эквивалентную индуктивность ЧЭ₁ (0,28%) по сравнению с ЧЭ₂ (0,22%).

На рис. 5.14, а изображено семейство ФП в полном объеме, т.е. в виде зависимостей $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ при температуре $\Theta = 1000^\circ\text{C}$. Из графиков следует, что, несмотря на изменения температуры более чем на 900°C (от нормальной), коды C_1 и C_2 остаются в установленных для них интервалах 1024...512 и 512...0 соответственно.

Сравнение семейств ФП, полученных при нормальной температуре (см. рис. 3.21) и при 1000°C (рис. 5.14, а) позволяет найти ФВ температуры как отношение ΔC_Θ (см. рис. 5.13) к максимально возможному интервалу ΔC_{\max} :

$$\delta C_\Theta = \frac{\Delta C_\Theta}{\Delta C_{\max}} \cdot 100\%,$$

где ΔC_{\max} для семейств ФП на рис. 3.21 и 5.14, а составляет 200 единиц¹.

Семейство ФВ ($\delta C_{\Theta 1}(x, y)$ и $\delta C_{\Theta 2}(x, y)$) представлено на рис. 5.14, б и характеризует возможные температурные погрешности. Максимальная погрешность не превышает 15%. При этом значения $\delta C_{\Theta 1}$

¹ Предельные значения ΔC_{\max} (512) обеспечивают минимальные значения ФВ и, как следствие, минимально возможные температурные погрешности.

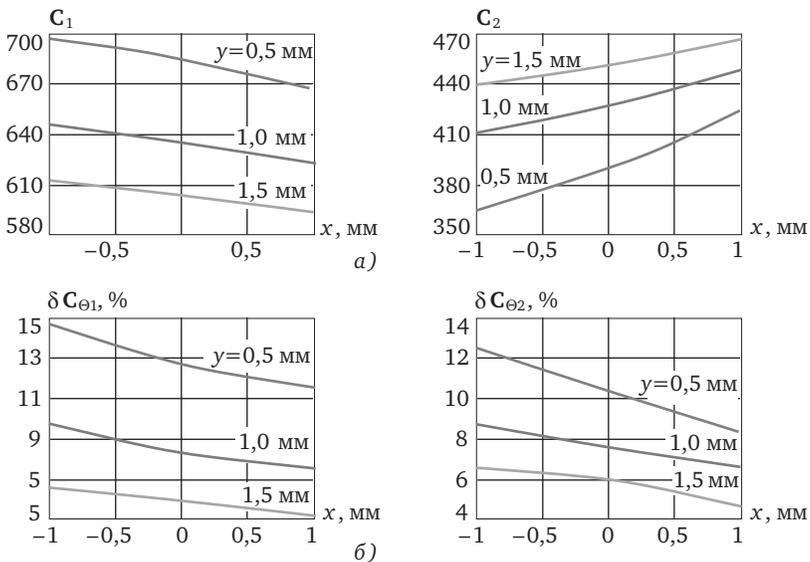


Рис. 5.14. Семейства ФП $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ (а) и ФВ температуры $\delta C_{\Theta 1}(x, y)$ и $\delta C_{\Theta 2}(x, y)$ (б) (meth 1)

незначительно превышают $\delta C_{\Theta 2}$. Если увеличением диапазона изменений или повышением чувствительности к y -координате удастся получить $\Delta C_{\max} = 512$, то погрешность уменьшается до 6%.

Далее приводятся результаты вычислительных экспериментов в предположении использования в системе *meth 2*.

На рис. 5.15 представлены ФП, полученные в результате моделирования, в виде зависимостей $C_1(x)$ и $C_2(x)$ при $y = 0,5$ мм и температурах 20 и 1000 °С. Как и ожидалось, изменения температуры в указанном диапазоне вызывают уменьшение кода C_1 ($-\Delta C_{\Theta \text{л}}$) и увеличение C_2 ($+\Delta C_{\Theta \text{л}}$), причем величины $\Delta C_{\Theta \text{л}}$ примерно одинаковы.

На рис. 5.16, а изображено семейство ФП в полном объеме ($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$) при температуре $\Theta = 1000$ °С (семейство ФП при температуре 20 °С приведено на рис. 3.19). Из графиков видно, что при изменении температуры коды C_1 и C_2 , как и в случае реализации в системе *meth 1*, остаются в тех же установленных интервалах (1024...512 и 512...0).

Результаты исследования семейства ФВ $\delta C_{\Theta 1}(x, y)$ и $\delta C_{\Theta 2}(x, y)$, которые вычисляются аналогично семействам ФВ, характеризующим

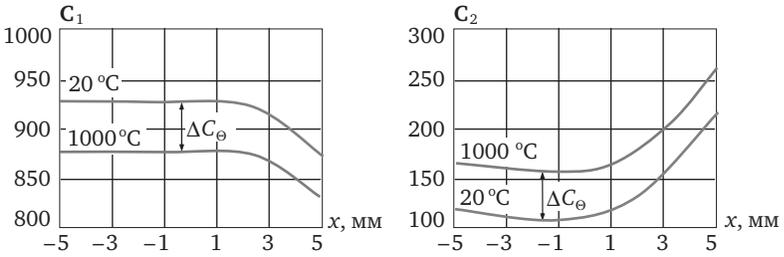


Рис. 5.15. Влияние изменения температуры на ФП $C_1(x)$ и $C_2(x)$ при $y = 0,5$ мм (*meth 2*)

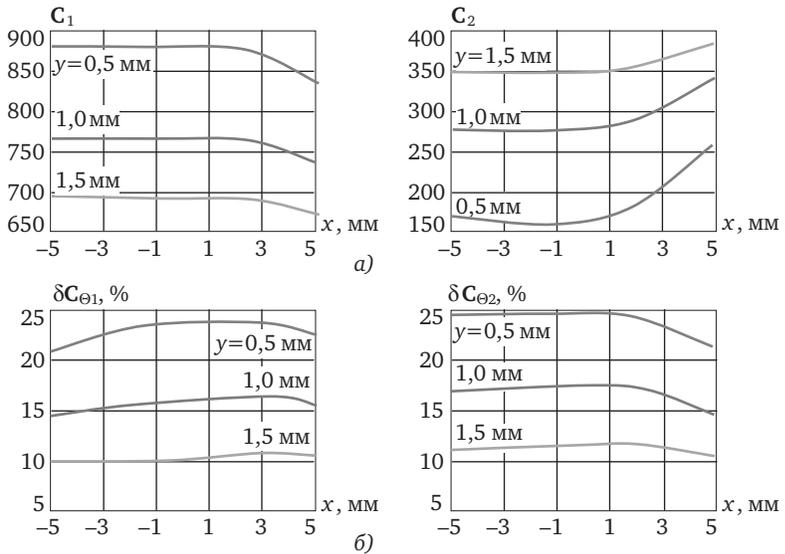


Рис. 5.16. Семейства ФП $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ (а) и ФВ температуры $\delta C_{\theta 1}(x, y)$ и $\delta C_{\theta 2}(x, y)$ (б) (*meth 2*)

meth 1, представлены на рис. 5.16, б. Исходными данными для таких расчетов являются ФП, полученные при нормальных условиях (20°C) и при температуре 1000°C . Максимальная погрешность не превышает 25%.

Как уже отмечалось, результаты вычислительных экспериментов, представленные на рис. 5.14 и 5.16, проводились в предположении использования в системе измерения аппаратного способа

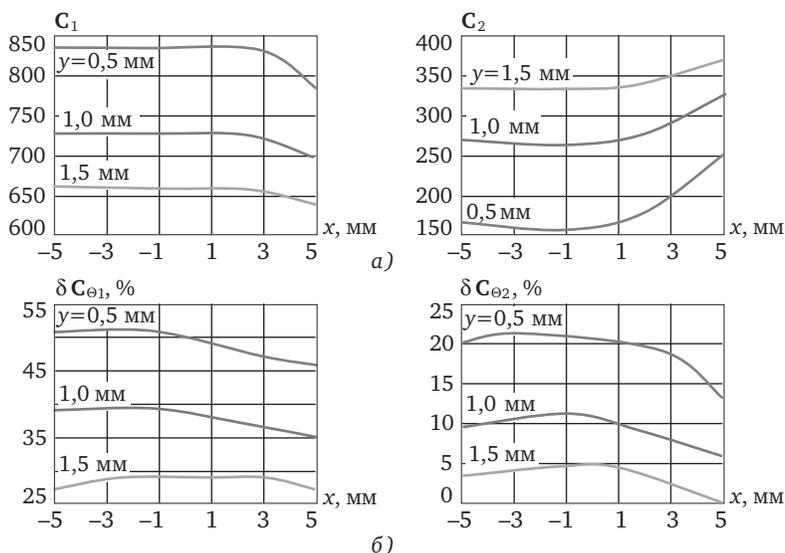


Рис. 5.17. Семейства ФП (а) и ФВ температуры до 1000 °С (б) при отсутствии температурной коррекции источника питания ИЦ-НС (E_k) (*meth 2*)

коррекции температурных воздействий на ОВТД путем изменения напряжения питания ИЦ E_k . Аналогичные вычислительные эксперименты были проведены и в предположении использования в системе измерения алгоритмического способа коррекции температурных воздействий на ОВТД (первого из двух предложенных способов). Их результаты показали идентичность семейств ФП и ФВ температуры тем, что представлены на рис. 5.14 и 5.16 для *meth 1* и *meth 2* (расхождение в семействах ФВ не превышает 1,6%).

И, наконец, завершают настоящий подраздел результаты вычислительных экспериментов, выполненных в предположении использования в системе по-прежнему *meth 2*, но в условиях отсутствия как алгоритмической, так и аппаратной коррекции с изменением температуры, воздействующей на ОВТД (при этом индуктивность L_d возрастает с увеличением температуры до 1000 °С в том же процентном выражении (4,9%).

Результаты исследований представлены на рис. 5.17. Анализ полученных данных показывает, что, несмотря на отсутствие коррекции, семейство ФП $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ остается в пределах изменений

кода 1024...512 и 512...0. Однако возможное расширение диапазона изменений y -координаты ($P3$) или повышение чувствительности за счет ОВТД или сопротивлений (R_1, R_2) в цепи обратной связи ПТН и коэффициента масштабирования МУс (k_m) могут вывести коды C_1 и C_2 из установленных пределов и тем самым нарушить принятое в системе правило идентификации кодов.

Вместе с тем наблюдается существенное увеличение ФВ $\delta C_{\Theta 1}(x, y)$, характеризующих возможные температурные погрешности (они превышают 50%). При этом $\delta C_{\Theta 2}(x, y)$ уменьшается (около 20%), что демонстрирует высокую степень несимметрии ФВ температуры и может отрицательно повлиять на качество термокоррекции семейства ГХ системы измерения ([1, 2], раздел 4.4).

Уменьшение влияния температуры. Известен способ коррекции влияния температурных воздействий на ОВТД и лопатки рабочего колеса ([1, 2], раздел 4.4), который предусматривает применение встроенных в датчики ОВТД₁ и ОВТД₂ ТП, нормализацию ЭДС на выходах ТП (e), аналого-цифровое преобразование и получение кодов (C_e), а также последующую обработку в ПЭВМ (рис. 5.18). Одновременно в РК (ОВТД₁ и ОВТД₂) в соответствии с *meth 1* и *meth 2* осуществляется преобразование x, y -координат смещений торцов лопаток в эквивалентные индуктивности ЧЭ₁ и ЧЭ₂ и первичных обмоток СТ₁ и СТ₂ (L_{11}^3, L_{12}^3). Последующие преобразования происходят в ИЦ-НС, где формируются коды C_1 и C_2 , которые далее поступают в ПЭВМ.

Вместе с тем согласно известному способу с помощью специально разработанных градуировочного устройства и термокамеры обеспечивается предварительное экспериментальное получение семейства ГХ ($C_1(x, y, \Theta)$ и $C_2(x, y, \Theta)$), на основе которого составляется система уравнений:

$$\begin{cases} C_1 = C_1(x, y, \Theta); \\ C_2 = C_2(x, y, \Theta). \end{cases}$$

После вычисления физических значений температуры Θ (по кодам C_e) в ПЭВМ производится решение системы уравнений и вычисление искомых x, y -координат.

Следует отметить возможность эффективного применения рассмотренного известного способа для уменьшения температурных погрешностей, т.е. ФВ температуры, представленных на рис. 5.17, б. Однако, как уже отмечалось, рассмотренный способ в существую-

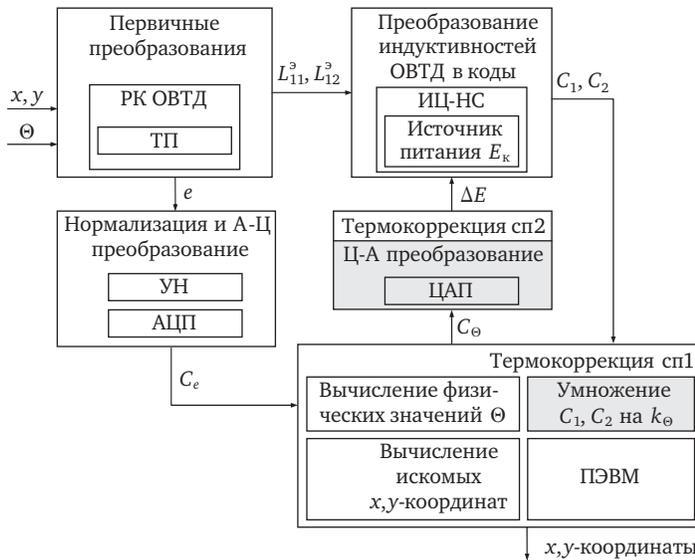


Рис. 5.18. Структурно-функциональная схема, поясняющая способы коррекции температурных воздействий

щем виде не гарантирует надежной идентификации кодов C_1 и C_2 при увеличении чувствительности датчиков к изменениям РЗ и диапазона изменения РЗ, а также при увеличении сопротивлений в цепях обратной связи ПТН и коэффициента масштабирования МУс.

Указанный недостаток известного способа устраняется двумя дополнительными операциями в структурно-функциональной схеме (на рис. 5.18 выделено тонированием), которые отражают вновь предложенные способы коррекции температурных воздействий на ОВТД (алгоритмический (сп1) и аппаратный (сп2)). Вместе с тем необходимо еще раз подчеркнуть, что оба предложенных способа термокоррекции обеспечивают только постоянство кода C_0 при отсутствии лопатки в зонах чувствительности датчиков, а также коррекцию температурных воздействий непосредственно на датчики в рабочих режимах их взаимодействия с лопатками. Что же касается известного способа, то с его помощью уменьшаются составляющие погрешности, связанные с воздействием температуры на лопатки (ФВ температуры, характеризующие такие погрешности, показаны на рис. 5.14, б и 5.16, б соответственно).

В заключение также необходимо отметить, что температурным воздействиям подвержены эквивалентные сопротивления R_3 первичных обмоток обоих СТ. Полагая, что при изменениях температуры в зоне ЧЭ датчика усредненное изменение температуры всех элементов его конструкции можно примерно оценить в $500\text{ }^\circ\text{C}$, а соответствующие изменения R_3 ориентировочно на 50%. При этом наибольшее изменение кода в ИЦ-НС с приближенным дифференцированием (см. раздел 3.1), реализующей метод ПП, будет не более 0,1%.

5.2.2. Погрешности измерения температуры чувствительного элемента датчика в канале термокоррекции

Как уже отмечалось, ЧЭ ОВТД, находясь в газозвдушном тракте турбины, подвергаются существенным температурным воздействиям, что является причиной значительных температурных изменений индуктивности ЧЭ и, как следствие, соответствующих погрешностей.

Поэтому при получении измерительной информации о радиальных и осевых смещениях в системе производится термокоррекция, предусматривающая экспериментальное определение семейств ГХ во всем диапазоне температур Θ (см. раздел 4.4), а также измерение текущих значений температуры ЧЭ с помощью ТП, встроенных в ОВТД. В системе предусмотрены также специальные каналы термокоррекции, в которых осуществляется нормализация сигналов ТП, преобразование в код, расчет физических значений с последующим вычислением координат x и y с учетом текущих значений температуры [1].

Необходимо отметить, что ГСп встроенной в датчик ТП находится на расстоянии около 5 мм от ЧЭ внутри ТВ, соединяющих ЧЭ с ОВ СТ, который размещен с внешней стороны статорной оболочки в зоне низких температур. В существующих системах измерения координат смещения торцов лопаток принято, что температура среды в газозвдушном тракте ($\Theta_{\text{ср}}$) равна температуре ЧЭ ($\Theta_{\text{ЧЭ}}$) и равна температуре ГСп ТП ($\Theta_{\text{ТП}}$), т.е. $\Theta_{\text{ср}} = \Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ТП}}$, причем это равенство сохраняется как в процессе градуировки, так и на рабочих режимах турбины. Между тем представляется очевидным, что большой температурный перепад между средой в газозвдушном тракте и внешней по отношению к статорной оболочке воздушной средой создает

тепловой поток в ТВ и, как следствие, температурный перепад на участке между ЧЭ и ГСп ТП, который определяет погрешность измерения температуры в канале термокоррекции. В известных литературных источниках отсутствуют какие-либо количественные оценки таких погрешностей, и исследования в настоящем разделе призваны устранить существующий пробел.

Анализ погрешностей. На рис. 5.19, а дано схематическое и существенно упрощенное изображение ОВТД, удобное для анализа теплообмена между элементами конструкции датчика и окружающей средой. Здесь, в частности, два соосных цилиндрических ТВ, разделенных тонким слоем высокотемпературного диэлектрика, представлены как один цилиндр с внутренним радиусом r_1 и внешним r_2 . Кроме того, конструктивные особенности ОВТД и способ крепления датчика таковы, что в установочном отверстии существует воздушный зазор между ТВ и статорной оболочкой, который сводит к минимуму теплообмен между ними. Поэтому можно считать, что тепловой поток q не имеет каких-либо потерь по ТВ от ЧЭ до СТ в соответствии с моделью, приведенной на рис. 5.19, б.

Тогда выражение для теплового потока можно представить в виде:

$$q = \frac{\Theta_{\text{ЧЭ}} - \Theta_{\text{СТ}}}{R_{\text{T}}}, \quad (5.1)$$

где R_{T} — тепловое сопротивление ТВ, которое можно представить суммой тепловых сопротивлений от ЧЭ до ГСп ТП (R_{T1}) и от ГСп до СТ (R_{T2}), т.е. $R_{\text{T}} = R_{\text{T1}} + R_{\text{T2}}$. Тепловой поток q , проходящий через тепловое сопротивление R_{T1} , создает на нем температурный перепад $\Delta\Theta = qR_{\text{T1}}$, который определяет погрешность Δ измерения температуры $\Theta_{\text{ЧЭ}}$ ($\Theta_{\text{сп}}$). Используя выражение (5.1), искомая погрешность

$$\Delta = \Delta\Theta_1 = \frac{\Theta_{\text{ЧЭ}} - \Theta_{\text{СТ}}}{R_{\text{T1}} + R_{\text{T2}}} \cdot R_{\text{T1}}. \quad (5.2)$$

Если $\Theta_{\text{ЧЭ}}$ изменяется в диапазоне от $\Theta_{\text{ЧЭmin}}$ до $\Theta_{\text{ЧЭmax}}$, то, обозначив в выражении (5.2) температурный перепад $\Theta_{\text{ЧЭ}} - \Theta_{\text{СТ}} = \Delta\Theta$, можно получить приведенную погрешность в виде:

$$\delta = \frac{\Delta}{\Theta_{\text{ЧЭmax}} - \Theta_{\text{ЧЭmin}}} \cdot 100\% = \frac{\Delta\Theta}{\Theta_{\text{ЧЭmax}} - \Theta_{\text{ЧЭmin}}} \cdot \frac{R_{\text{T1}}}{R_{\text{T1}} + R_{\text{T2}}} \cdot 100\%. \quad (5.3)$$

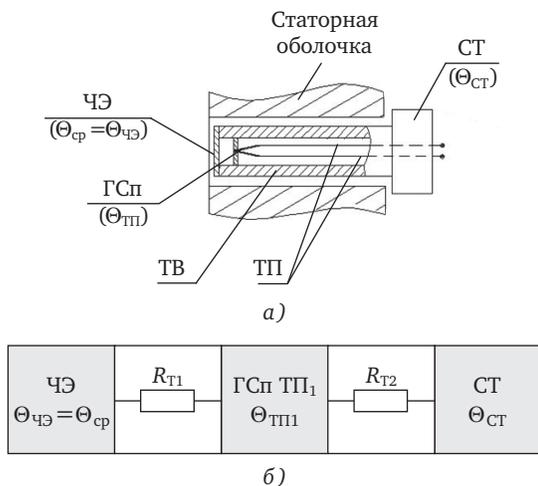


Рис. 5.19. Схематическое изображение ОВТД со встроенной ТП (а) и модель передачи тепла (б)

Из выражения (5.3) следует, что δ зависит от температурного перепада $\Delta\Theta$, который определяется не только изменениями $\Theta_{ЧЭ}$ (Θ_{cp}), но и изменениями температуры $\Theta_{СТ}$, причем изменения могут быть весьма существенны в турбинах. При этом величина первого множителя в выражении (5.3) может изменяться от 0 до 1.

Второй множитель $R_{Т1}/(R_{Т1} + R_{Т2})$ всегда меньше единицы и его величина зависит от конструкции и размеров ТВ. Для упрощенного варианта ТВ (см. рис. 5.1) тепловые сопротивления:

$$R_{Т1} = \frac{l_1}{\lambda S}, \quad R_{Т2} = \frac{l_2}{\lambda S}, \quad (5.4)$$

где l_1, l_2 — длины рассматриваемых участков ТВ; $S = \pi(r_2^2 - r_1^2)$ — площадь сечения, а λ — коэффициент теплопроводности материала ТВ.

После подстановки $R_{Т1}, R_{Т2}$ (5.4) в выражение (5.3), можно записать:

$$\delta = \frac{\Delta\Theta}{\Theta_{ЧЭ\max} - \Theta_{ЧЭ\min}} \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2} \cdot 100\%. \quad (5.5)$$

Если изменения $\Delta\Theta$ происходят во всем диапазоне, а $l_1 \approx 0,1l_2$, то относительная погрешность δ не превышает 10%. В реальных кон-

струкциях ОВТД с более тщательным учетом их особенностей и размеров погрешность может оказаться выше (до 20% и более).

Метод уменьшения погрешности и экспериментальная оценка его эффективности. Предлагается метод уменьшения температурной погрешности. Метод предусматривает применение дополнительной ТП, встроенной в датчик, ГСп которой размещается в конце ТВ в месте контакта с ОВ СТ. Предусматривается также расчёт температуры ЧЭ ($\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ср}}$) с помощью модели передачи тепла в ТВ и измеренных значений температур в точках размещения ГСп обеих ТП. Модель передачи тепла в ТВ датчика с двумя встроенными ТП приведена на рис. 5.20.



Рис. 5.20. Модель передачи тепла в ТВ с двумя встроенными ТП

Очевидно, что в соответствии с такой моделью можно записать, что температура ЧЭ определяется температурой, измеренной ТП₁ ($\Theta_{\text{ТП1}}$) и перепадом температур между ЧЭ и ГСп ТП₁, т.е. перепадом температур на тепловом сопротивлении $R_{\text{Т1}}$ ($\Delta\Theta_1$):

$$\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ТП1}} + \Delta\Theta_1 = \Theta_{\text{ТП1}} + q \cdot R_{\text{Т1}}. \quad (5.6)$$

При этом тепловой поток q можно вычислить по перепаду температур на тепловом сопротивлении $R_{\text{Т2}}$, найденному в результатах измерений с помощью ТП₁ и ТП₂:

$$q = \frac{\Theta_{\text{ТП2}} - \Theta_{\text{ТП1}}}{R_{\text{Т2}}}. \quad (5.7)$$

С учетом (5.7) выражение (5.6) примет вид:

$$\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ТП1}} + (\Theta_{\text{ТП2}} - \Theta_{\text{ТП1}}) \cdot \frac{R_{\text{Т1}}}{R_{\text{Т2}}}, \quad (5.8)$$

или с учетом формул (5.4):

$$\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ТП1}} + (\Theta_{\text{ТП2}} - \Theta_{\text{ТП1}}) \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (5.9)$$

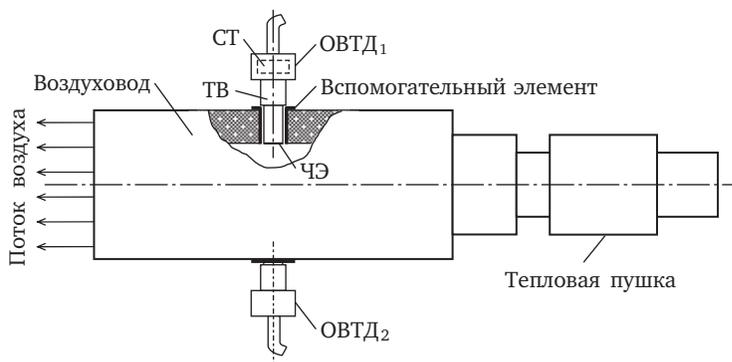


Рис. 5.21. Схематическое изображение установки

Экспериментальная проверка предложенного метода. Схематическое изображение установки для экспериментальных исследований представлено на рис. 5.21. Установка состоит из воздуховода, входное отверстие которого сопряжено с выходом миниатюрной тепловой пушки¹, обеспечивающей регулируемый по температуре поток горячего воздуха в пределах от 50 до 600 °С (на входе воздуховода). Воздуховод прямоугольного сечения (35×40 мм²) выполнен в огнеупорном кирпиче. Толщина боковой стенки 30 мм, верхней и нижней — по 15 мм. Воздуховод заключён в металлическую оболочку, а на его боковых стенках размещены вспомогательные элементы, обеспечивающие установку и крепёж двух ОВТД². При этом оси датчиков ортогональны оси воздуховода, а ЧЭ, расположенные вблизи внутренних поверхностей боковых стенок воздуховода, параллельны его оси.

В каждый из датчиков, в которых уже существуют по одной ТП (их ГСп расположены в начале ТВ поблизости от ЧЭ), дополнительно встроены ещё по одной ТП (ГСп расположены в конце ТВ рядом с СТ), причём ЧЭ датчиков также оснащаются ТП (по одному ГСп непосредственно на ЧЭ)³. Результаты измерения температур (в трёх точках на каждый датчик) индицируются в цифровом виде на мультиметре М838 с разрешением 1 °С.

¹ Используется устройство промышленного изготовления Hot Air Gun QUICK 885 мощностью 2500 Вт.

² Вспомогательные элементы аналогичны тем, что используются при установке и креплении датчиков на статорных оболочках компрессоров и турбин ГТД.

³ Используются хромель-алюмелевые (ХА) ТП.

Объекты исследования — датчики, изготовленные из нержавеющей стали с длиной ЧЭ 10 мм, его сечение $1 \times 1 \text{ мм}^2$ (ОВТД₁), а также с длиной ЧЭ 14 мм, его сечение $2,5 \times 1 \text{ мм}^2$ (ОВТД₂).

В табл. 5.1 приведены результаты измерений температуры ЧЭ ($\Theta_{\text{ЧЭ}}$) и ТВ ($\Theta_{\text{ТП1}}$ и $\Theta_{\text{ТП2}}$). Температура воздуха на выходе тепловой пушки ($\Theta_{\text{П}}$) измерялась её собственными (встроенными) средствами, температуры $\Theta_{\text{ЧЭ}}$, $\Theta_{\text{ТП1}}$, $\Theta_{\text{ТП2}}$ — терморезисторами ТП_{ЧЭ}, ТП₁, ТП₂ соответственно (с последующим выходом на мультиметр М838).

Таблица 5.1. Результаты измерений температуры ЧЭ и ТВ в исследуемых датчиках

Температура, °C (ОВТД ₁)				Температура, °C (ОВТД ₂)			
$\Theta_{\text{П}}$	$\Theta_{\text{ЧЭ}}$	$\Theta_{\text{ТП1}}$	$\Theta_{\text{ТП2}}$	$\Theta_{\text{П}}$	$\Theta_{\text{ЧЭ}}$	$\Theta_{\text{ТП1}}$	$\Theta_{\text{ТП2}}$
100	60	45	36	100	63	40	33
200	106	71	50	200	114	62	45
400	232	139	83	400	225	109	70
500	285	175	106	500	275	138	90
600	338	201	117	600	325	158	100

Размещение ГСп на ЧЭ и ТВ иллюстрирует рис. 5.22. Там же изображены модель передачи тепла в ТВ от ЧЭ до СТ и геометрические параметры тепловых сопротивлений R_{T1} от ГСп ТП_{ЧЭ} до ГСп ТП₁ и R_{T2} от ГСп ТП₁ до ГСп ТП₂

$$R_{\text{T1}} = \frac{l_1}{\lambda S_1}, \quad R_{\text{T2}} = R_{\text{T21}} + R_{\text{T22}} = \frac{l_{21}}{\lambda S_{21}} + \frac{l_{22}}{\lambda S_{22}},$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала ТВ (нержавеющая сталь); l_1 — длина первого участка ТВ с площадью сечения $S_1 = \pi(r_{1\text{н}}^2 - r_{1\text{в}}^2)$; $r_{1\text{н}}$, $r_{1\text{в}}$ — наружный и внутренний радиусы соответственно; R_{T21} — тепловое сопротивление участка ТВ длиной l_{21} и площадью сечения $S_{21} = \pi(r_{21\text{н}}^2 - r_{21\text{в}}^2)$; $r_{21\text{н}}$, $r_{21\text{в}}$ — наружный и внутренний радиусы участка соответственно; R_{T22} — тепловое сопротивление участка ТВ длиной l_{22} и площадью сечения $S_{22} = \pi(r_{22\text{н}}^2 - r_{22\text{в}}^2)$, $r_{22\text{н}}$, $r_{22\text{в}}$ — наружный и внутренний радиусы этого участка¹.

Вместе с тем предложенный метод предусматривает расчёт температуры ЧЭ по измеренным с помощью ТП₁ и ТП₂ температурам

¹ Ранее рассматривалась более упрощенная тепловая модель ТВ, в которой внешний диаметр ТВ предполагался неизменным по его длине.

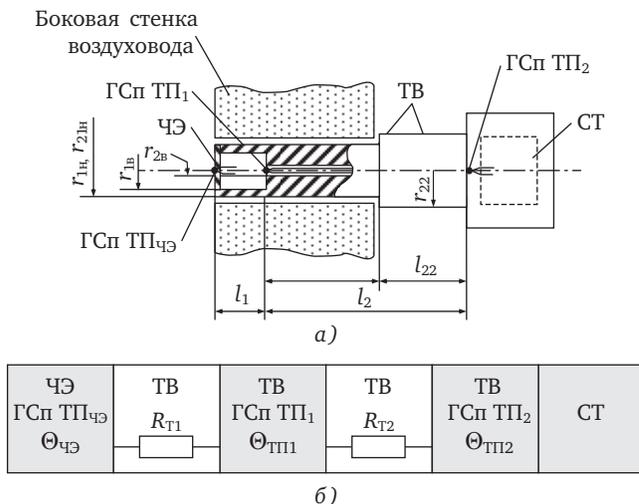


Рис. 5.22. Геометрические параметры тепловых сопротивлений R_{T1} и R_{T2} (а) и модель передачи тепла в ТВ от ЧЭ до СТ (б)

$\Theta_{ТП1}$ и $\Theta_{ТП2}$ (табл. 5.1) и вычисленным заранее тепловым сопротивлениям R_{T1} и R_{T2} (для заданных значений теплопроводности нержавеющей стали и размеров ТВ):

$$\Theta_{ЧЭ} = \Theta_{ТП1} + (\Theta_{ТП1} - \Theta_{ТП2}) \frac{R_{T1}}{R_{T2}}. \quad (5.10)$$

Тогда искомая погрешность измерения определяется разностью измеренных и расчетных значений температур ЧЭ:

$$\Delta = \Theta_{ЧЭ} - \Theta_{ЧЭ(p)}, \quad (5.11)$$

или в относительном виде

$$\delta = \frac{\Delta}{\Theta_{ЧЭ}} \cdot 100\%. \quad (5.12)$$

Расчеты температуры $\Theta_{ЧЭ(p)}$ и погрешностей Δ , δ были выполнены согласно выражениям (5.11)—(5.12) при $\lambda = 31,401$ Вт/(м·К), $l_1 = 7$ мм, $l_{21} = 19$ мм, $l_{22} = 38$ мм, $r_{1н} = 10$ мм, $r_{1б} = 9,5$ мм, $r_{21н} = r_{1н} = 10$ мм, $r_{22н} = 14$ мм, $r_{2б} = 1,5$ мм для ОВТД₁; $l_1 = 12,3$ мм, $l_{21} = 20$ мм, $l_{22} = 46$ мм, $r_{1н} = 14$ мм, $r_{1б} = 13,4$ мм, $r_{21н} = r_{1н} = 14$ мм, $r_{22н} = 17$ мм, $r_{2б} = 1,5$ мм для ОВТД₂. Полученные результаты свиде-

ны в табл. 5.2, в которой для привязки к данным табл. 5.1 в первую колонку повторно введены измеренные значения температуры потока на выходе тепловой пушки $\Theta_{\text{п}}$.

Таблица 5.2. Расчетные значения температуры ЧЭ и погрешностей её измерения

ОВТД ₁				ОВТД ₂			
$\Theta_{\text{п}}$, °C	$\Theta_{\text{ЧЭ(р)}}$, °C	Δ , °C	δ , %	$\Theta_{\text{п}}$, °C	$\Theta_{\text{ЧЭ(р)}}$, °C	Δ , °C	δ , %
100	59,27	0,73	1,2	100	59,86	3,14	5,0
200	104,29	1,71	1,6	200	110,24	3,76	3,3
400	227,78	4,22	1,8	400	219,68	5,32	2,4
500	284,39	0,61	0,2	500	274,22	0,78	0,3
600	334,17	3,83	1,1	600	322,59	2,41	0,7

Из табл. 5.2 следует, что максимальная погрешность Δ составляет 5,32 °C, а в относительном виде δ не превышает 5% (причём при минимальной температуре $\Theta_{\text{ЧЭ}}$). Это подтверждает работоспособность и эффективность предложенного метода. Если же метод не использовать, то погрешность измерения можно оценить по экспериментальным данным табл. 5.1 как разность температуры ЧЭ ($\Theta_{\text{ЧЭ}}$) и температуры в начале ТВ ($\Theta_{\text{ТП1}}$), измеренных ТП_{ЧЭ} и единственной встроенной ТП₁ (в существующих конструкциях ОВТД):

$$\Delta_3 = \Theta_{\text{ЧЭ}} - \Theta_{\text{ТП1}}.$$

Сравнение Δ_3 с Δ , найденной с помощью выражения (5.11), показывает, что Δ_3 в несколько раз превышает Δ .

Однако необходимо отметить, что в соответствии с принятым в предложенном методе допущении, теплообмен между ЧЭ и СТ происходит путём теплопроводности по ТВ, представленным двумя тепловыми сопротивлениями R_{T1} и R_{T2} , а теплообмен через боковые поверхности ТВ незначителен и практически отсутствует. Тогда окружающую ТВ среду также можно представить эквивалентным тепловым сопротивлением $R_{1\text{ср}}$, параллельным R_{T1} , и сопротивлением $R_{2\text{ср}}$, параллельным R_{T2} . При этом $R_{1\text{ср}} \gg R_{\text{T1}}$, а $R_{2\text{ср}} \gg R_{\text{T2}}$ и заметного влияния на тепловой поток в ТВ, как и на температуру $\Theta_{\text{ТП1}}$, $R_{1\text{ср}}$ и $R_{2\text{ср}}$ не оказывают. Так и происходит в установке для экспериментальных исследований ОВТД, в которой воздуховод выполнен из материала с малой теплопроводностью.

Но в реальных силовых установках, где статорные оболочки изготовлены из материалов с намного большей теплопроводностью, может оказаться весьма существенным эффект шунтирования сопротивлений R_{T1} и R_{T2} эквивалентными сопротивлениями R_{1cp} и R_{2cp} соответственно, причём в наибольшей степени ожидается влияние R_{1cp} на R_{T1} , поскольку вся площадь поверхности именно этой части ТВ (вблизи ЧЭ) контактирует со статорной оболочкой. В результате температура $\Theta_{ТП1}$ будет приближаться к температуре $\Theta_{ЧЭ}$ (ЧЭ). Для получения количественной оценки $\Theta_{ТП1}$, а следовательно, и погрешности измерения температуры $\Theta_{ЧЭ}$, необходима разработка более совершенной модели теплообмена в ТВ ОВТД и окружающей среды, включая статорную оболочку и вспомогательные элементы конструкции для крепежа и установки датчиков. Кроме того, несмотря на положительный результат проведенных исследований, представляется полезным продолжение экспериментальных работ, аналогичных лабораторным, но на реальных объектах (турбине) в процессе стендовых испытаний.

5.3. Погрешности, связанные с изменениями частоты импульсного питания и скорости вращения рабочего колеса

В разделе 4 на рис. 4.2 представлены зависимости кодов АЦП на выходе варианта ИЦ-НС как функции времени при прохождении лопаткой рабочего колеса зоны чувствительности ЧЭ ОВТД₁ в составе кластера. При этом вид функции $C(t)$ зависит от реализуемого в ИЦ-НС метода измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток (*meth 1*, *meth 2*). Кроме того, предполагается, что период повторения импульсов питания T_n и их длительность Δt минимальны ($T_n, \Delta t \rightarrow 0$), а потому функции $C(t)$ можно считать практически непрерывными, но труднореализуемыми и существующими только в идеале.

Рисунок 5.23 иллюстрирует процесс дискретизации с конечным шагом (равным периоду импульсов питания T_n), но отличающимся по величине в предположении одинаковой скорости вращения рабочего колеса (рис. 5.23, а, б), и, напротив, с постоянным периодом T_n , но на другой (более высокой) скорости вращения (рис. 5.23, а, в). Предполагается также, что в ИЦ-НС реализован *meth 1*.

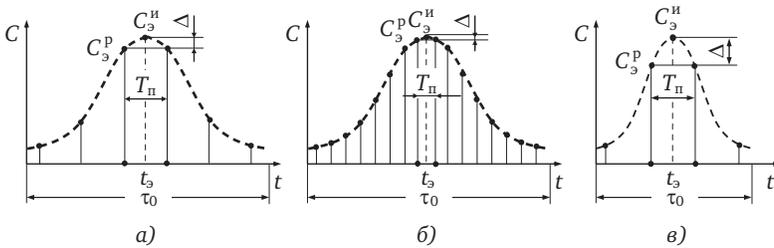


Рис. 5.23. Погрешности, связанные с изменением периода импульсного питания при постоянной скорости вращения рабочего колеса (а, б) и с изменением скорости его вращения при постоянном периоде импульсного питания (а, в)

Идеализированные функции $C(t)$ на рис. 5.23 показаны штриховой линией, а их экстремумы обозначены $C_3^И$. Там же показаны дискретизированные значения функции, в том числе ближайшие по значению к $C_3^И$, причём равноудалённые от него по времени (на $T_П/2$), что соответствует наибольшей разности реальных экстремумов $C_3^П$ и идеального $C_3^И$. Эту разность и предлагается далее использовать для оценки погрешностей, связанных с изменениями периода импульсного питания и скорости вращения рабочего колеса:

$$\Delta_d = C_3^И - C_3^П. \quad (5.13)$$

Очевидно, что при неизменной скорости вращения рабочего колеса погрешность Δ_d уменьшается с повышением частоты импульсного питания (уменьшения периода $T_П$) (см. рис. 5.23, а, б). Однако погрешность возрастает с повышением скорости вращения рабочего колеса при постоянной частоте (периоде) импульсного питания (рис. 5.23, а, в). Эти достаточно очевидные соображения должны быть подтверждены количественными оценками погрешностей как при реализации в ИЦ-НС *meth 1*, так и *meth 2*. Результаты таких исследований приводятся в настоящем разделе.

Вместе с тем, как отмечалось в разделе 4.3, при обработке данных, полученных в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, применяются алгоритмы аппроксимации дискретных отсчётов (после предварительной обработки данных с выхода АЦП и, в частности, адаптивного сжатия). При этом за информативное значение кода принимается экстремум аппроксими-

рующей функции C_3^a . Тогда искомая погрешность будет определяться разностью C_3^H и C_3^a :

$$\Delta_a = C_3^H - C_3^a. \quad (5.14)$$

Результаты количественной оценки погрешностей такого вида также приведены в настоящем разделе.

5.3.1. Оценки погрешностей по экстремальным значениям кодов без использования алгоритмов аппроксимации

В оценке погрешностей использовались промежуточные результаты моделирования семейства ФП — зависимостей цифровых кодов на выходе ИЦ-НС от координаты z ($C(z)$) для нахождения экстремальных значений этой функции, по которым, в конечном счёте, определяют каждую точку семейств ФП $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ (см. раздел 3).

Функции $C(z)$, вычисленные по модели ИЦ-НС с очень малым шагом по времени (эквивалент в линейном выражении по z до 0,05 мм), можно считать идеальными $C^H(t)$, а их экстремумы — C_3^H . Вместе с тем функцию $C^H(t)$ можно использовать для определения дискретных значений кода при любом выбранном шаге дискретизации, включая коды C_3^P .

На рис. 5.24 в безразмерном виде представлена зависимость $C^H(z)/C_3^H$, полученная на модели ИЦ-НС при заданных координатах $x = 1$ мм, $y = 0,5$ мм (предполагается, что в ИЦ-НС реализован

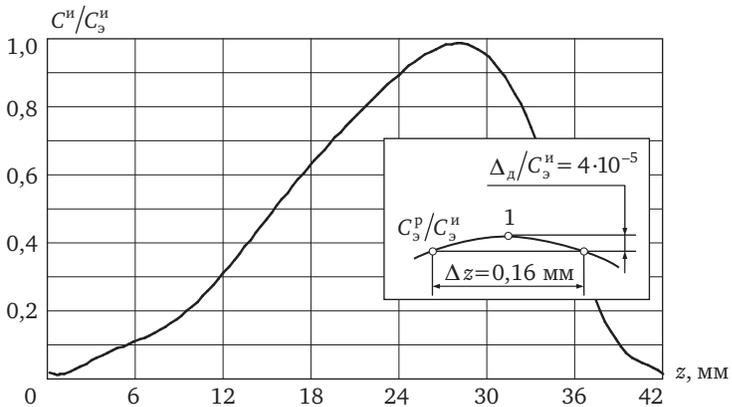


Рис. 5.24. Зависимость $C^H(z)/C_3^H$ (meth 1) и пример количественной оценки погрешности Δ_H/C_3^H («апликация»)

meth 1). Рабочее колесо имеет радиус 0,5 м, число лопаток 100, частота вращения $3000 \dots 21\,000 \text{ мин}^{-1}$, а частота импульсного питания $(1 \dots 10) \cdot 10^6 \text{ Гц}$ (период $T_{\text{п}}$ — $(1 \dots 0,1) \cdot 10^{-6} \text{ с}$).

Пусть частота вращения рабочего колеса 3000 мин^{-1} . Тогда период вращения $T_0 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, а время τ_0 (см. рис. 4.2 и 5.23) будет равно $200 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, причём в линейном выражении τ_0 будет соответствовать шаг установки лопаток $z_{\text{л}} = 31,4 \text{ мм}$.

Если частота импульсного питания $1 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ и период $T_{\text{п}}$ (т.е. шаг дискретизации) составляет $1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, то число отсчётов k за время τ_0 составит 200, а шаг дискретизации в линейном выражении будет равен $\Delta z = z_{\text{л}}/k$, т.е. 0,16 мм. Для найденного шага ($\Delta z_1 = 0,16 \text{ мм}$) на функции $C^{\text{и}}(z)/C_3^{\text{и}}$ (рис. 5.24) в соответствии с рис. 5.23 и формулой (5.13) вычисляется максимальная приведенная погрешность:

$$\delta_{\text{д}} = \frac{\Delta}{C_3^{\text{и}}} \cdot 100\% . \quad (5.15)$$

Для указанных выше исходных данных и приведенных результатов моделирования погрешность $\delta_{\text{д}} = 0,004\%$ (рис. 5.24, «апликация»).

Результаты расчёта погрешности $\delta_{\text{д}}$ для остальных значений частоты импульсного питания $f_{\text{п}}$ и скорости вращения рабочего колеса $n_{\text{рк}}$ в указанных ранее диапазонах изменений представлены в табл. 5.3, а на рис. 5.25 те же результаты изображены графически.

Из табл. 5.3 и графиков рис. 5.25 следует, что при реализации *meth 1* погрешность $\delta_{\text{д}}$ невелика и даже при минимальной частоте $f_{\text{п}}$ и наибольшей скорости вращения $n_{\text{рк}}$ не превышает 0,23%. При этом увеличение погрешности связано с увеличением шага дискретизации в линейном выражении до 1,1 мм.

Аналогичные исследования погрешностей, связанных с изменениями $f_{\text{п}}$ и $n_{\text{рк}}$, были проведены применительно к ИЦ-НС, реализующей *meth 2*.

На рис. 5.26 представлена функция $C^{\text{и}}(z)/C_3^{\text{и}}$, полученная на модели ИЦ-НС при заданных координатах $x = -5 \text{ мм}$ и $y = 1 \text{ мм}$. Следует

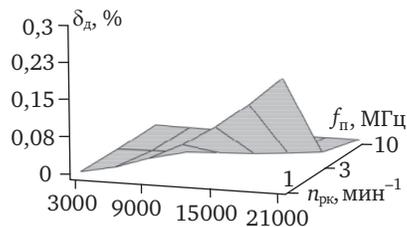


Рис. 5.25 Погрешности $\delta_{\text{д}}$ ($f_{\text{п}}$, $n_{\text{рк}}$) (*meth 1*)

Таблица 5.3. Погрешности δ_d , %, в зависимости от частоты $f_{п}$ и частоты вращения $n_{рк}$ (*meth 1*)

$n_{рк}, \text{мин}^{-1}$	$f_{п}, \text{Гц}$		
	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$
3000	0,004	0,0003	0,000004
6000	0,002	0,002	0,0001
9000	0,004	0,004	0,0003
12000	0,007	0,008	0,001
15000	0,12	0,01	0,001
18000	0,17	0,02	0,001
21000	0,23	0,03	0,002

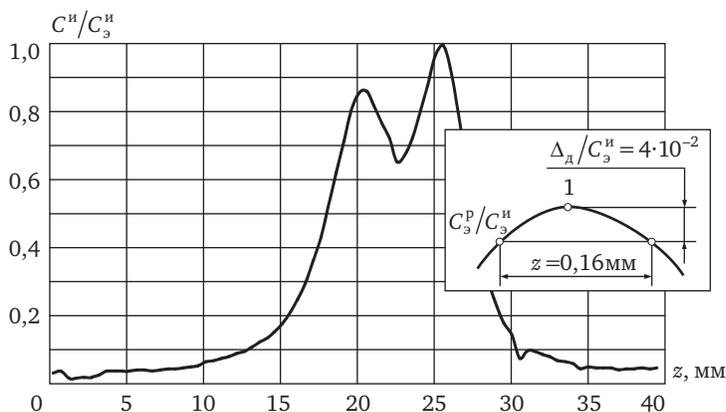


Рис. 5.26. Зависимость $C^И(z)/C_э^И$ (*meth 2*) и пример количественной оценки погрешности $\Delta_d/C_э^И$ («апликация»)

отметить, что при указанных значениях координаты x наблюдается

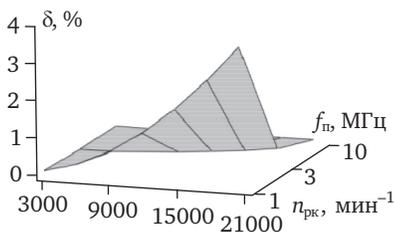


Рис. 5.27. Погрешности $\delta_d(f_{п}, n_{рк})$ (*meth 2*)

максимальный «разбаланс» экстремальных значений, причём наибольший из экстремумов характеризуется самыми крутыми фронтами и острой вершиной, что, в свою очередь, приводит к увеличению искомых погрешностей.

Расчёт погрешностей выполнялся для тех же значений исходных данных, что и для *meth 1*,

Таблица 5.4. Погрешности δ_d , %, в зависимости от частоты f_{Π} и частоты вращения $n_{\text{рк}}$ (*meth 2*)

$n_{\text{рк}}$, мин ⁻¹	f_{Π} , Гц		
	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$
3000	0,08	0,01	0,00004
6000	0,33	0,03	0,002
9000	0,75	0,08	0,01
12000	1,33	0,14	0,01
15000	2,06	0,23	0,02
18000	2,93	0,33	0,03
21000	3,93	0,45	0,04

в том числе для частоты f_{Π} и частоты вращения $n_{\text{рк}}$. Результаты расчётов приведены в табл. 5.4 и на рис. 5.27. Как и ожидалось, погрешности δ_d с увеличением f_{Π} уменьшается и, напротив, с повышением частоты вращения $n_{\text{рк}}$ наблюдается её рост. Однако максимум погрешности при реализации *meth 2* достигает примерно 4%¹ и более чем на порядок превышает аналогичную погрешность при реализации *meth 1*.

5.3.2. Оценка погрешностей при использовании алгоритмов аппроксимации кодов

Для оценки рассматриваемых в настоящем разделе погрешностей используются те же результаты моделирования ИЦ-НС, представленные в виде зависимостей $C^H(z)/C_3^H$ на рис. 5.24 (*meth 1*) и рис. 5.26 (*meth 2*). По ним же определяются как экстремальные значения, так и значения выбранных кодов, найденных для вычисляемых значений шага дискретизации в линейном выражении, полученные по заданным частотам импульсного питания f_{Π} и вращения рабочего колеса $n_{\text{рк}}$ (табл. 5.3, 5.4 и рис. 5.25, 5.27).

Для аппроксимации выбранных кодов в ИЦ-НС и системе измерения, реализующей *meth 1*, в разделе 4.3 предлагается использовать алгоритм, предусматривающий применение ортогонального полинома Чебышёва I рода. Погрешность вычисляется по формуле (5.15), где вместо Δ_d , согласно (5.14), подставляется Δ_a , а вместо C_3^P

¹ Эта же погрешность (Δ_d/C_3^H) показана на рис. 5.26 в виде «апликации».

Таблица 5.5. Погрешности $\delta_a(f_{\text{п}}, n_{\text{рк}})$ при аппроксимации зоны экстремума ортогональным полиномом Чебышёва I рода (*meth 1*), %

$n_{\text{рк}}, \text{мин}^{-1}$	$f_{\text{п}}, \text{Гц}$		
	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$
3000	0,005	0,005	0,002
6000	0,005	0,005	0,005
9000	0,006	0,005	0,006
12000	0,006	0,006	0,006
15000	0,006	0,005	0,005
18000	0,003	0,005	0,005
21000	0,006	0,006	0,006

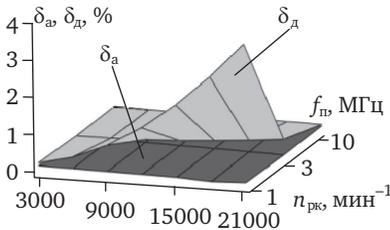


Рис. 5.28. Погрешности δ_a и δ_d в зависимости от $f_{\text{п}}$ и $n_{\text{рк}}$ (при использовании аппроксимации и без неё соответственно, *meth 2*)

код S_3^a , полученный в результате поиска экстремума аппроксимирующей функции (раздел 4.3).

Результаты расчётов, приведенные в табл. 5.5, показывают, что погрешность δ_a сравнительно равномерно распределена в диапазоне изменений частот $f_{\text{п}}$ и $n_{\text{рк}}$ и не превышает 0,006% (максимально возможная погрешность δ_d без использования алгоритма аппроксимации, приведенная в

табл. 5.3, была в десятки раз больше, достигая 0,23%).

Для аппроксимации выбранных кодов в ИЦ-НС и систем измерения, реализующих *meth 2*, в разделе 4.3 предлагается алгоритм, предусматривающий использование в качестве аппроксимирующей функции квадратичную параболу и определение её экстремального значения (вершины параболы). Расчёт погрешности δ_a ведётся по формуле (5.15) аналогично расчётам, приведенным выше (при тех же исходных данных, включая $f_{\text{п}}$ и $n_{\text{рк}}$). Его результаты, представленные в табл. 5.6 и на рис. 5.28, показывают существенное снижение погрешностей δ_a на несколько порядков (для наглядности на рис. 5.28 совмещены графики функций $\delta_a(f_{\text{п}}, n_{\text{рк}})$ и $\delta_d(f_{\text{п}}, n_{\text{рк}})$, полученные с использованием аппроксимации и без неё).

В то же время следует отметить, что как применительно к *meth 1*, так и к *meth 2*, на малых скоростях вращения (до 3000 мин^{-1}) и частоте питания выше 3 МГц вряд ли целесообразно применение алго-

Таблица 5.6. Погрешности $\delta_a(f_{\text{п}}, n_{\text{рк}})$ при аппроксимации зоны экстремума квадратичной параболой (*meth 2*), %

$n_{\text{рк}}, \text{мин}^{-1}$	$f_{\text{п}}, \text{Гц}$		
	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$
3000	0	0,0003	0,0002
6000	0,009	0,0006	0,0002
9000	0,002	0,002	0,0003
12000	0,003	0,003	0,0003
15000	0,004	0,005	0,0004
18000	0,008	0,009	0,0005
21000	0,07	0,01	0,0007

ритмов аппроксимации, так как выигрыш в точности определения экстремума будет небольшим при значительном усложнении обработки данных и сопутствующих этому увеличению требуемых вычислительных ресурсов и временных затрат.

5.4. Погрешность алгоритма вычисления координат x, y

Как уже отмечалось, в системах измерения координат x, y , реализующих кластерные методы, для вычисления искомым координат используются коды C_1 и C_2 , соответствующие изменениям эквивалентных индуктивностей ЧЭ ОВТД₁ и ОВТД₂ в составе кластера, а также семейства ГХ — $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$, полученные экспериментально. Составляется система уравнений (4.10) и находится её решение (координаты x, y).

Если функции $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ монотонны, а это имеет место при использовании *meth 1*, то система (4.10) решается с помощью алгоритма на основе метода Ньютона [1, 7]. Если функции $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ немонотонны, что связано с применением *meth 2*, то для вычисления координат x, y используется специально разработанный алгоритм, описание которого приведено в разделе 4.4. Там же дана графическая интерпретация алгоритма, где коды C_1 и C_2 представлены плоскостями, параллельными плоскости OXY системы отсчета $SOXY$, а семейство ГХ $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ двумя поверхностями в той же самой системе отсчета. Пересечение плоскостей C_1 и C_2 с поверхностями $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ происходит по кривым линиям, и их проекции на плоскость OXY также являются кривыми.

При этом координаты x и y точки пересечения проекций кривых согласно разработанному алгоритму являются решением системы уравнений (4.10). Последующие операции предусматривают поиск ячейки градуировочной сетки прямоугольной формы, где находится точка пересечения (стороны ячейки равны шагу по каждой из координатных осей $(x_{ш}, y_{ш})$ градуировочной таблицы (ГТ)). Далее в пределах найденной ячейки определяются координаты точки пересечения, причем внутри ячейки отрезки кривых заменяются отрезками прямых.

Представляется очевидным, что координаты точки пересечения отрезков кривых (x_k, y_k) будут отличаться от координат точки пересечения прямых (x_p, y_p) , а их разности можно считать погрешностями разработанного алгоритма (рис. 5.29):

$$\Delta x = x_k - x_p, \Delta y = y_k - y_p. \quad (5.16)$$

В работах [11, 12], а также в других известных публикациях отсутствуют какие-либо сведения о погрешностях вычисления координат x, y торцов лопаток. Поэтому целью настоящего раздела являются исследования и количественные оценки таких погрешностей.

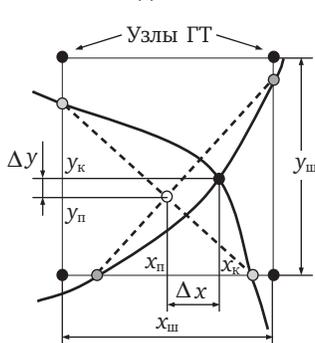


Рис. 5.29. Графическое представление погрешностей вычисления координат x, y в ячейке ГТ

Из рис. 5.29 следует, что в пределах одной ячейки наибольшие значения Δx и Δy наблюдаются в окрестностях центра ячейки. Кроме того, вполне ожидаемым является их рост в каждой ячейке ГТ с увеличением шага $(x_{ш}, y_{ш})$, и наоборот — снижение с уменьшением шага. Количественные оценки таких погрешностей определяют содержание первой серии (1) вычислительных экспериментов. Содержание второй серии (2) определяют исследования распределения погрешностей внутри ячеек, в том числе поблизости границ, где они стремятся к нулевым значениям.

Результаты планируемых вычислительных экспериментов должны подтвердить сделанные предположения. Однако на предварительном этапе, предшествующем проведению исследований в рамках серий 1 и 2, производится выбор семейства ФП в виде зависимостей кодов от координат x, y , за-

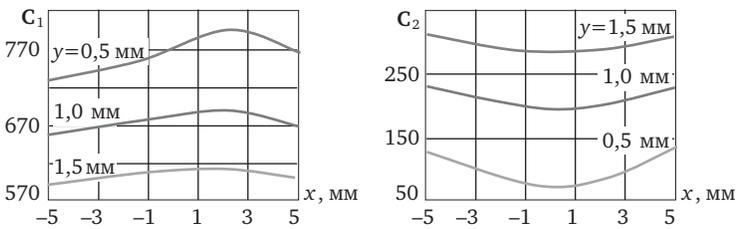


Рис. 5.30. Семейства ГХ, полученные экспериментально (прототип)

данных аналитически, т.е. формулами, которые используются для получения ГТ с различными значениями $x_{ш}$, $y_{ш}$. Важным условием выбора такого семейства $C_{1ан}(x, y)$ и $C_{2ан}(x, y)$ является подобие семейству ГХ, $C_1(x, y)$ и $C_1(x, y)$, полученному экспериментально с использованием турбинной лопатки. В свою очередь, прототип выбран из множества семейств ГХ по нескольким критериям.

Во-первых, каждая из функций семейства ГХ, как $C_1(x)$, так и $C_2(x)$, при $y = \text{const}$ должна быть немонотонна при наличии наиболее выраженных экстремальных значений. При этом в изменениях кодов по координате x должен наблюдаться рост C_1 до максимума с последующим спадом и, наоборот, спад C_2 с последующим ростом.

Во-вторых, диапазоны изменений координат x, y должны быть одинаковы, а хотя бы приближенное равенство желательно в чувствительности кодов к изменениям координат и, в первую очередь, к изменениям координаты y (РЗ)¹.

И, наконец, в-третьих, координаты экстремальных значений кодов C_1 и C_2 по оси X должны соответствовать расстоянию между центрами ЧЭ₁ и ЧЭ₂ ОВТД в составе РК (около 2 мм). Семейство ГХ прототипа представлено на рис. 5.30, а подобное ему базовое семейство ФП, предназначенное для получения ГТ, имеет вид:

$$\begin{cases} C_{1ан}(x, y) = A_{0,0} - A_{0,1}x + A_{0,2}x^2 + A_{1,0}y - A_{1,1}xy + \\ + A_{1,2}x^2y + A_{2,0}y^2 - A_{2,1}xy^2 + A_{2,2}x^2y^2; \\ C_{2ан}(x, y) = B_{0,0} - B_{0,1}x + B_{0,2}x^2 + B_{1,0}y - B_{1,1}xy + \\ + B_{1,2}x^2y + B_{2,0}y^2 - B_{2,1}xy^2 + B_{2,2}x^2y^2, \end{cases} \quad (5.17)$$

¹ Среди имеющихся в наличии прототипов далеко не все соответствуют перечисленным критериям, что связано с некоторыми отличиями формы и размеров турбинных лопаток, использованных в процессе получения семейств ГХ, рассматриваемых как возможные прототипы.

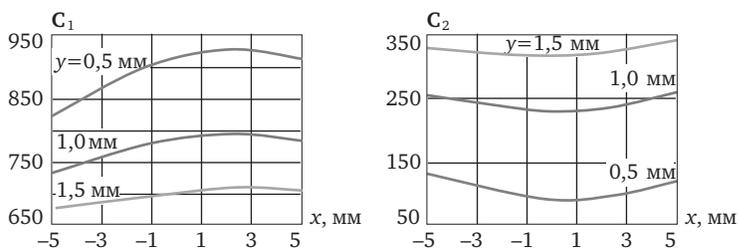


Рис. 5.31. Семейства ФП, полученные аналитически для определения погрешности алгоритма вычисления

где A и B — коэффициенты. Семейства $C_{1ан}(x, y)$ и $C_{2ан}(x, y)$ приведены на рис. 5.31¹.

Вычислительные эксперименты серии 1 начинаются с построения ГТ с заданными $x_{ш}, y_{ш}$. Для этого используется семейство ФП, представленное выражениями (5.17). Выбирается одна из «ячеек» ГТ и для ее центра с координатами $x_{ц}, y_{ц}$ (промежуточными значениями между «узлами» ГТ) с помощью выражения (5.17) находят коды $C_{1ц}$ и $C_{2ц}$. Полученные ГТ и коды $C_{1ц}$ и $C_{2ц}$, как исходные данные, вводятся в программу, реализующую разработанный алгоритм, в которой выходными данными являются расчетные значения координат $x_{цр}$ и $y_{цр}$. Можно утверждать, что заданным и расчетным значениям координат ($x_{ц}, y_{ц}$ и $x_{цр}, y_{цр}$) в выражении (5.16) соответствуют координаты точки пересечения отрезков кривых и прямых ($x_{к}, y_{к}$ и $x_{п}, y_{п}$). С учетом этого искомую погрешность можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_{к} - x_{п} = x_{ц} - x_{цр}, \\ \Delta y &= y_{к} - y_{п} = y_{ц} - y_{цр}. \end{aligned} \quad (5.18)$$

Выражение (5.18) используется для вычисления погрешности в выбранной ячейке, а затем процедура повторяется для остальных ячеек в данной ГТ и других ГТ с иными значениями $x_{ш}, y_{ш}$.

Они представляются в виде приведенных погрешностей и определяются по формулам:

¹ Семейства $C_{1ан}(x, y)$ и $C_{2ан}(x, y)$, приведенные на рис. 5.31, получены для значений $A_{0,0} = 1087,9; A_{0,1} = 15,08; A_{0,2} = -2,648; A_{1,0} = -395,6; A_{1,1} = 11,76; A_{1,2} = 2,1716; A_{2,0} = 92,358; A_{2,1} = 2,648; A_{2,2} = -0,513$ и $B_{0,0} = -89,06; B_{0,1} = -4,5331; B_{0,2} = 1,6848; B_{1,0} = 417,54; B_{1,1} = 6,666; B_{1,2} = -0,942; B_{2,0} = -97,92; B_{2,1} = -1,7533; B_{2,2} = 0,1853$.

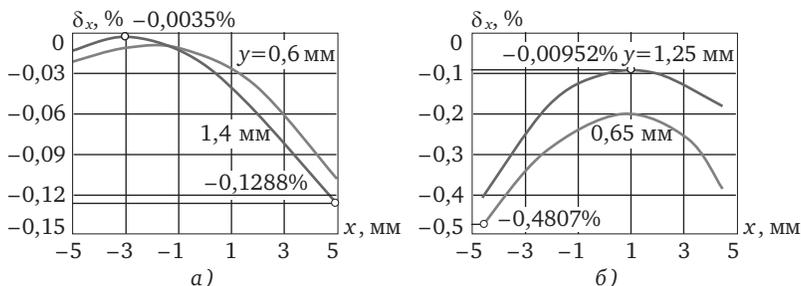


Рис. 5.32. Семейства $\delta_x(x)$ при $y = \text{const}$:
 а — $x_{\text{ш}} = y_{\text{ш}} = 0,2$ мм; б — $x_{\text{ш}} = 1,0$ мм, $y_{\text{ш}} = 0,3$ мм

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot 100\%, \quad \delta_y = \frac{\Delta y}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100\%,$$

где $x_{\max} - x_{\min}$, $y_{\max} - y_{\min}$ — диапазоны изменений координат x и y .

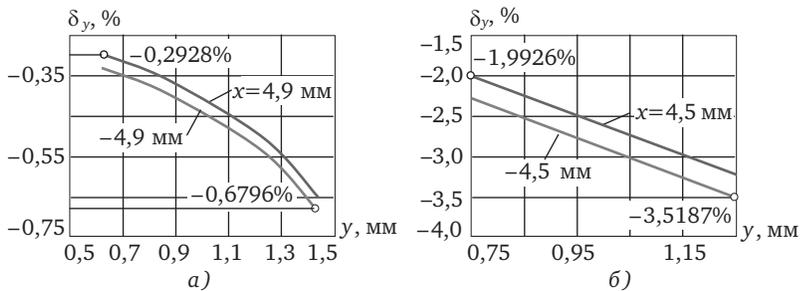
В процессе последующих вычислительных экспериментов исследовались погрешности δ_x в зависимости от координаты x ($\delta_x(x)$) при постоянных значениях координаты y ($y = \text{const}$) для выбранных значений $x_{\text{ш}} = 0,2$ мм при $y_{\text{ш}} = \text{var}$ (0,1; 0,2; 0,3; 0,5 мм), а также последовательно для $x_{\text{ш}}$, равных 0,3; 0,5 и 1 мм при изменениях $y_{\text{ш}}$ в указанном выше диапазоне.

Из всего множества проведенных вычислительных экспериментов на рис. 5.32 представлены всего лишь два семейства $\delta_x(x)$. Первое из них (рис. 5.32, а) для y , равного 0,6 и 1,4 мм при $x_{\text{ш}} = y_{\text{ш}} = 0,2$ мм, второе (рис. 5.32, б) для y , равного 0,65 и 1,25 мм при $x_{\text{ш}} = 1$ мм, $y_{\text{ш}} = 0,3$ мм. Общим для обоих семейств $\delta_x(x)$ (как, впрочем, и для всех остальных, оставшихся «за кадром») является одинаковый характер изменения δ_x по координате x , проявляющийся в наличии перегиба и экстремального значения на каждой из функций (наличие экстремальных значений кодов характерно и для семейств ФП и ГХ, представленных на рис. 5.30 и 5.31). При этом большая часть из множества исследованных погрешностей δ_x имеет отрицательный знак, в том числе и те, что представлены на рис. 5.32.

Отличительная особенность семейств $\delta_x(x)$, представленных на рис. 5.32, — это одинаковые значения погрешности δ_x для двух значений функции $\delta_x(x)$ при y , равном 0,6 и 1,4 мм (точка пересечения обеих функций).

Таблица 5.7. Граничные значения погрешностей δ_x , %

$y_{ш}$	$x_{ш}$			
	0,2	0,3	0,5	1,0
0,1	-0,0392	-0,0529	-0,1282	-0,4533
	-0,0051	-0,008	-0,0043	0,05858
0,2	-0,1288	-0,1206	-0,1607	-0,4853
	-0,0035	-0,0128	-0,0289	-0,022
0,3	-0,2538	-0,2428	-0,2611	-0,4807
	-0,0011	-0,0139	-0,0434	-0,0952
0,5	-0,7165	-0,6894	-0,6836	-0,6602
	0,01795	0,00269	-0,0412	-0,1642

Рис. 5.33. Семейства $\delta_y(y)$ при $x = \text{const}$:

а — $x_{ш} = y_{ш} = 0,2$ мм; б — $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,5$ мм

Следует также отметить, что на рис. 5.32 обозначены границы изменения погрешностей для каждого из представленных семейств $\delta_x(x)$. Эти значения погрешностей размещены в табл. 5.7 наряду с теми значениями, которые были получены в вычислительных экспериментах при всех ранее перечисленных значениях $x_{ш}, y_{ш}$.

Как и ожидалось, с увеличением шага $x_{ш}$ и $y_{ш}$ до 1 и 0,5 мм соответственно, погрешности δ_x по модулю (без учета знака) остаются менее 1,0% (рассматриваемые значения δ_x расположены по диагонали таблицы и тонированы).

Далее в рамках первой серии исследовались погрешности δ_y в зависимости от координаты y ($\delta_y(y)$) при постоянных значениях координаты x ($x = \text{const}$) для тех же значений шага $x_{ш}, y_{ш}$ и в той же последовательности, в которой определялись погрешности δ_x .

На рис. 5.33 представлены семейства $\delta_y(y)$ при x , равном $-4,9$ и $+4,9$ мм, $x_{ш} = y_{ш} = 0,2$ мм (рис. 5.33, а), а также при x , равном $-4,5$ и $+4,5$ мм, $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,5$ мм (рис. 5.33, б).

Таблица 5.8. Граничные значения погрешностей δ_y , %

$y_{ш}$	$x_{ш}$			
	0,2	0,3	0,5	1,0
0,1	-0,1825	-0,1824	-0,1803	-0,1533
	-0,0636	-0,0545	-0,021	0,11724
0,2	-0,6796	-0,6797	-0,6785	-0,6567
	-0,2928	-0,2865	-0,2552	-0,1277
0,3	-1,2707	-1,2715	-1,273	-1,2655
	-0,6955	-0,693	-0,6637	-0,5477
0,5	-3,5319	-3,5276	-3,5273	-3,5187
	-2,101	-2,1091	-2,0813	-1,9926

На обоих графиках погрешность δ_y отрицательна и возрастает по модулю с увеличением y , причем такой характер изменений сохраняется во всех остальных вычислительных экспериментах, проводимых в оставшихся сочетаниях $x_{ш}, y_{ш}$ (за исключением значений $x_{ш} = 1,0$ мм, $y_{ш} = 0,1$ мм, знак погрешности δ_y остается отрицательным). Следует отметить также монотонный характер изменений погрешности $\delta_y(y)$, что соответствует характеру изменений кодов от y на графиках семейства ГХ прототипа и ФП на рис. 5.30 и 5.31.

Количественные оценки погрешностей δ_y (по результатам вычислительных экспериментов, проведенных в полном объеме) представлены в табл. 5.8.

Как видно из табл. 5.8, погрешность δ_y при выбранном значении $y_{ш}$ незначительно зависит от $x_{ш}$. Напротив, при выбранном $x_{ш}$ погрешность δ_y существенно возрастает (примерно до 3,5% по модулю). При этом указанный рост δ_y наблюдается при всех выбранных значениях $x_{ш}$ (0,2; 0,3; 0,5; 1,0 мм).

Полученные результаты первой серии вычислительных экспериментов могут иметь важную практическую значимость при выборе шага в процессе экспериментального получения семейства ГХ и соответствующих ГТ при заданных погрешностях вычисления искомым координат. Пусть (к примеру) δ_y и δ_x не могут быть больше 1%. Тогда по данным табл. 5.8 $y_{ш}$ не может превышать 0,2 мм (при любом значении $x_{ш}$ от 0,2 мм до 1 мм включительно). При этом согласно табл. 5.7 δ_x также не превышает 1% при тех же значениях $x_{ш}, y_{ш}$.

Методика проведения вычислительных экспериментов серии 2 в целом аналогична серии 1, но отличается тем, что исследуется рас-

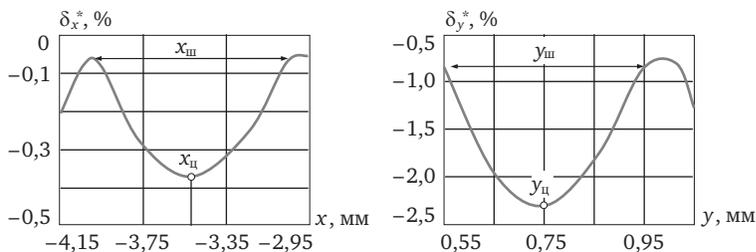


Рис. 5.34. Распределение погрешности $\delta_x^*(x)$ и $\delta_y^*(y)$ в границах выбранной ячейки ГТ

пределение погрешностей δ_x^* и δ_y^* только в границах одной ячейки, т.е. в пределах $x_{ш}$, $y_{ш}$ ГТ.

При этом исследуются $\delta_x^*(x)$ при постоянстве координаты y , соответствующей центру выбранной ячейки $y_{ц}$ и с заданным шагом $x_{ш}^*$, равным, например, десятой части $x_{ш}$ ГТ ($x_{ш}^* = 0,1x_{ш}$). Кроме того, исследуется $\delta_y^*(y)$ при постоянстве координаты x , соответствующей центру выбранной ячейки ($x_{ц}$) и с заданным шагом $y_{ш}^*$, выбранным, например, равным $0,1y_{ш}$ ГТ. На рис. 5.34 представлены погрешности $\delta_x^*(x)$ (а) и $\delta_y^*(y)$ (б), полученные в результате вычислительных экспериментов в ячейке ГТ с координатами её центра $x_{ц} = -3,5$ мм, $y_{ц} = 0,75$ мм и шагами $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,5$ мм.

Как и ожидалось, погрешности δ_x^* и δ_y^* достигают максимума в центре ячейки и стремятся к нулю на ее границах.

Заключение к разделу 5

Разработана новая модель ЭМВ как ЧЭ рабочего ОВТД с контролируемой и соседними лопатками, так и компенсационного с соседними лопатками. С помощью разработанной модели получены семейства ФП в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей ЧЭ рабочего и компенсационного ОВТД от x, y -координат смещений торцов лопаток сложной формы, которые далее использованы для расчёта ФВ соседних лопаток при различных значениях шага установки лопаток. Показано, что влияние соседних лопаток на ЧЭ компенсационного ОВТД намного больше, чем на ЧЭ рабочего, и возрастает с уменьшением шага их установки.

С помощью модели дифференциальной ИЦ, исходными данными для которой являются результаты моделирования ЭМВ ЧЭ рабочего и

компенсационного ОВТД с контролируемой и соседними лопатками, представленными эквивалентными индуктивностями, изменяющимися во времени, получены семейства ФП в виде зависимостей цифровых кодов от x, y -координат. Указанные ФП использованы для расчёта ФВ соседних лопаток при различных значениях шага их установки.

Разработана методика получения семейства ГХ систем измерения x, y -координат, основной отличительной особенностью которой является использование имитатора рабочего колеса с несколькими лопатками из числа тех, что устанавливаются на реальном объекте. Методика позволяет в процессе градуировки учесть влияние соседних лопаток и избежать возможных погрешностей при дальнейшей эксплуатации систем измерения.

Исследовано влияние температуры в газоздушном тракте турбины на эквивалентные индуктивности ЧЭ и первичных обмоток СТ ОВТД, а также на цифровые коды АЦП на выходе ИЦ-НС.

С помощью модели ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки получены количественные оценки влияния температуры на эквивалентные индуктивности ЧЭ и первичных обмоток СТ. Показано, что при изменении температуры от 20 до 1000 °С изменения эквивалентных индуктивностей, связанные с воздействием температуры на удельное сопротивление материала лопатки, достигают почти 0,2% и более чем на порядок превышают изменения, связанные с температурными воздействиями на линейные размеры лопаток (в направлениях осей системы отсчета).

Приведены результаты экспериментальных исследований температурных воздействий на ОВТД при отсутствии лопатки в зоне его чувствительности. Показано, что температурные изменения эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ достигают почти 5% и многократно превышают изменения, связанные с температурными воздействиями на лопатку. Кроме того, приведены результаты суммарных воздействий температуры как на лопатку, так и на ОВТД, которые превышают изменения, связанные с РЗ, более чем в десять раз.

Проведенный упрощенный анализ ИЦ-НС в предположении отсутствия лопатки в зоне чувствительности ЧЭ ОВТД и воздействии температуры непосредственно на ОВТД выявил неполную компенсацию температурных воздействий, несмотря на дифференциальное включение ОВТД в ИЦ. Показано, что это приводит к смещению

кодов на выходе ИЦ-НС не только при отсутствии лопатки, но и при наличии лопатки в зоне чувствительности ЧЭ ОВТД, оказывая негативное влияние на идентификацию кодов C_1 и C_2 в процессе функционирования системы измерения.

Предложены алгоритмический и аппаратный способы устранения влияния температурных воздействий на ОВТД, предусматривающие использование информации о температуре со встроенных в ОВТД ТП. Кроме того, с помощью вычислительных экспериментов, проведенных на модели ИЦ, исходными данными для которой были результаты моделирования ЭМВ ЧЭ и торцевой части лопатки, в предположении использования предложенных способов получены семейства ФП при номинальной и нормальной температурах, а по их разности вычислены семейства ФВ температуры, характеризующие возможные температурные погрешности. Показано, что коды C_1 и C_2 остаются в установленных пределах, а ФВ определяются температурным воздействием исключительно на лопатку, примерно равны и не превышают 15% (*meth 1*) и 25% (*meth 2*). Максимальное значение таких погрешностей увеличивается примерно вдвое, если в системе измерения не используются предложенные способы, что подтверждает их эффективность.

Вместе с тем исследования погрешности измерения ТП температуры ЧЭ (а следовательно, и температуры среды в газоздушном тракте) выявили значительную погрешность, которая составляет 10...20% и более, что связано с вынужденной удаленностью ГСп ТП от ЧЭ.

Предложен способ уменьшения температурной погрешности, предусматривающий применение дополнительной ТП, встроенной в датчик, ГСп которой размещается в конце ТВ в месте контакта с ОВ СТ. Предусматривается также расчет температуры ЧЭ с помощью модели передачи тепла в ТВ и значений температур в точках размещения ГСп обеих ТП.

Проведенные экспериментальные исследования предложенного способа показали его высокую эффективность — погрешности измерения температуры ЧЭ в диапазоне от 100 до 500 °С за редким исключением не превышают 2,5%.

Исследованы погрешности, связанные с изменениями частоты импульсного питания ИЦ и скорости вращения рабочего колеса турбины. Искомая погрешность определяется разностью экстремальных

значений цифровых кодов, полученных в идеальной ИЦ (с периодом и длительностью импульсов питания, стремящимися к нулю) и кодами в реально существующей ИЦ (при этом экстремальные значения кодов получены в процессе моделирования зависимости кодов от координаты z при заданных значениях координат x и y , в предположении применения в системе измерения как *meth 1*, так и *meth 2*).

Вычислительные эксперименты проводились в диапазонах изменения частоты импульсного питания $(1...10) \cdot 10^6$ Гц и скорости вращения рабочего колеса от 3000 до 21 000 мин⁻¹. Как и ожидалось, погрешности возрастают с уменьшением частоты питания и увеличением частоты вращения рабочего колеса. Однако количественные оценки максимальных погрешностей отличаются более чем на порядок в зависимости от используемого в системе измерения метода и составляют около 0,2% для *meth 1* и почти 4% для *meth 2*, что связано с эффектом «двоения», который сопровождается увеличением крутизны функции $C(z)$ вблизи информативного экстремума. Вместе с тем применение алгоритмов аппроксимации выборок кодов и вычисления экстремальных значений аппроксимирующих функций позволяет существенно уменьшить такие погрешности. Показано, что при использовании в системе измерения *meth 1* и аппроксимирующего ортогонального полинома Чебышёва I рода в тех же диапазонах изменения частоты питания и частоты вращения рабочего колеса погрешность не превышает 0,006%, а при использовании *meth 2* и аппроксимирующей квадратичной параболы составляет не более 0,07%.

Для проведения исследований погрешностей алгоритма вычисления координат x, y смещений торцов лопаток осуществлен выбор семейства ФП в виде зависимостей кодов от координат x, y , заданных аналитически (т.е. формулами), которые используются для получения ГТ с варьируемыми значениями шага ($x_{ш}$ и $y_{ш}$). При этом важным условием выбора такого семейства является подобие прототипу — семейству ГХ, полученному экспериментально (с использованием турбинной лопатки), которое, в свою очередь, выбрано из множества семейств ГХ по нескольким критериям подобия (немонотонности зависимостей кодов от координаты x при наличии выраженных экстремумов и, напротив, монотонности зависимостей кодов от координаты y , одинаковых диапазонов изменений координат x, y соответственно и др.).

Для количественной оценки искомым погрешностей в выбранном семействе ФП при выбранных значениях $x_{ш}$ и $y_{ш}$ составляется ГТ. Для одной из «ячеек» ГТ и для её центра с координатами $x_{ц}$ и $y_{ц}$ с помощью ФП находятся соответствующие коды ($C_{1ц}$ и $C_{2ц}$). Исходные данные ГТ, а также коды $C_{1ц}$ и $C_{2ц}$ вводятся в программу вычисления координат, обеспечивающую получение расчетных значений координат центра выбранной «ячейки» ($x_{цр}$ и $y_{цр}$). Разности $x_{ц} - x_{цр}$ и $y_{ц} - y_{цр}$ определяют искомые погрешности как для выбранной, так и для остальных «ячеек» ГТ. Показано, что при изменении $x_{ш}$ в пределах 0,2...1 мм и $y_{ш}$ 0,1...0,5 мм погрешность вычисления по координате x возрастает, но остается менее 1%. В тех же диапазонах изменений $x_{ш}$ и $y_{ш}$ погрешность вычисления координаты y при выбранном $y_{ш}$ незначительно зависит от $x_{ш}$ и, напротив, при выбранном $x_{ш}$ существенно возрастает (примерно до 3,5%), причем указанный рост наблюдается при всех выбранных значениях $x_{ш}$.

Кроме того, проведены дополнительные исследования распределения погрешностей вычисления координат x, y внутри «ячеек» ГТ. При выбранном шаге, составляющем малые доли $x_{ш}$ и $y_{ш}$, показано, что погрешности вычисления возрастают до максимального значения в центре «ячейки» и уменьшаются до нуля на её границах (и это также соответствует ожидаемым результатам).

Количественные оценки погрешностей вычисления координат x, y имеют важную практическую значимость для выбора шага ($x_{ш}$ и $y_{ш}$) при экспериментальном получении семейства ГХ, когда указанная погрешность не должна превышать допустимых значений.

Система измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток

Приводится описание технических и программных средств системы измерения, построенной на основе новых разработок ОВТД, ориентированных на применение в турбине (см. раздел 1), дифференциальной ИЦ с приближенным дифференцированием и микросхемой АЦП на выходе (см. раздел 3), алгоритмов предварительной обработки, в том числе адаптивного сжатия данных, поиска экстремальных значений кодов и вычисления координат смещений торцов лопаток (см. раздел 4), в которых обеспечена реализация как *meth 1*, так и *meth 2* [55, 56]¹. Кроме того, представлены результаты экспериментальных исследований метрологических показателей системы, а также работоспособности и эффективности методов и средств их реализации.

6.1. Технические средства

Система обеспечивает измерение радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной кривизной поверхности пера (координат y и x соответственно). Она содержит нестандартные и стандартные технические средства (ТС).

Нестандартные ТС включают РК из двух ОВТД (ОВТД₁ и ОВТД₂), предназначенных для использования в турбинах (рис. 6.1). Предполагается, что в отличие от известных конструкций датчиков [1, 2], в ОВТД₁ и ОВТД₂ встроены по две термодпары (ТП₁₁, ТП₁₂ и ТП₂₁, ТП₂₂ соответственно), предназначенные для термокоррекции температурных воздействий на ЧЭ датчиков (см. разделы 1 и 5). К нестан-

¹ В работе [55], в отличие от [56], приведено более подробное описание системы измерения аналогичного назначения, однако в этой системе реализован только *meth 1*.

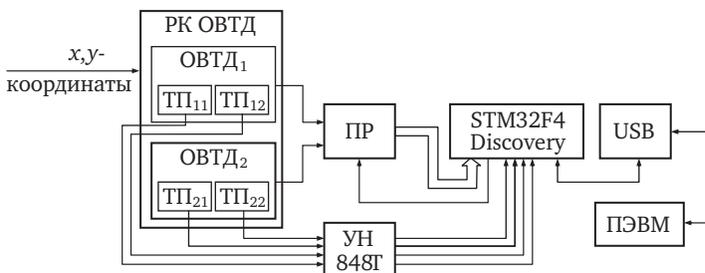


Рис. 6.1. Технические средства системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток

дартным ТС относится также ПР, представляющий собой вариант ИЦ-НС, включающий ПТН, МУС на ОУ и микросхему десятиразрядного АЦП (см. раздел 3).

ПР встроен в линию связи между ПК ОБТД и устройством предварительной обработки данных, причем данные с выхода АЦП передаются в виде параллельного кода.

В состав стандартных ТС входит устройство предварительной обработки цифровых данных — встраиваемый модуль STM32F4 Discovery на базе микроконтроллера STM32F407VGT6B [57]. Его отличительные особенности: 32-битное ядро Cortex-M3, 1 МВ памяти программ, 192 КВ ОЗУ, 16-канальный 12-разрядный АЦП, 12-разрядный ЦАП, набор таймеров общего назначения с расширенными функциями, последовательные коммуникационные интерфейсы UART, достаточное число дискретных портов ввода-вывода¹. Все сигналы доступны на внешних разъемах модулей. Для связи с ПЭВМ верхнего уровня по каналу USB модули оснащены преобразователями интерфейсов UART↔USB.

Для нормализации сигналов от термопар ТП₁₁, ТП₁₂ и ТП₂₁, ТП₂₂ использовано стандартное многоканальное устройство нормализации (УН) 848Г фирмы Rosemount, с выхода которого напряжения поступают на входы АЦП модуля STM32.

Конструктивно модуль STM32 и преобразователь UART↔USB смонтированы на кросс-плате. Плата имеет размеры, рекоменду-

¹ В работе [55] приводится описание устройства аналогичного назначения — модуля STM32VL Discovery, который, однако, выполнен на базе микроконтроллера с меньшими объемами памяти и скоростью обработки данных (микроконтроллер STM32F100RBT6).

мые стандартом DIN 43880 для размещения в типовых корпусах, закрепляемых на DIN-рейку [58].

6.2. Программное обеспечение системы

ПО системы имеет двухуровневую структуру. На нижнем уровне реализованы алгоритмы предварительной обработки цифровых кодов на выходе ПР в соответствии с описаниями, приведенными в разделе 4.2. ПО верхнего уровня реализует алгоритмы управления системой, аппроксимации цифровых кодов и поиска экстремальных значений, вычисления искомых координат x и y , описания которых приведены в разделах 4.1, 4.3, 4.4, а также осуществляет конфигурирование системы, обеспечивает оперативное отображение и архивирование измерительной информации.

6.2.1. Программное обеспечение нижнего уровня

Для работы ПО, реализующего алгоритм предварительной обработки цифровых кодов, в составе микроконтроллера STM32F407VGT6 задействованы следующие аппаратные средства: генератор тактовой частоты, таймер в режиме формирования временных интервалов, параллельный порт для подключения АЦП, встроенного в ПР, энергонезависимая память, а для связи с ПЭВМ верхнего уровня — встроенный модуль UART.

ПО содержит секции настройки блока внутреннего тактирования микроконтроллера, инициализации указанного периферийного оборудования и контроллера прерываний, измерения величины постоянной составляющей и уровня шума, сортировки и сжатия входного потока данных, обслуживания последовательного порта приема-передачи данных. В целях оптимизации по времени взаимодействие программы с периферийными устройствами производится в виде прямого обращения к соответствующим регистрам.

Отсчеты выходного сигнала ПР поступают на дискретный порт ввода-вывода в параллельном коде. Дискретизация по времени задается таймером. При этом формируются сигналы запуска ПР и чтения результата преобразования. В процессе синхронного чтения содержимого порта образуется входной поток исходных данных.

Процедура измерения величины постоянной составляющей и уровня шума, предшествующая получению целевой измерительной

информации, представляет собой отдельную программную секцию, которая выполняется однократно в режиме ручного запуска при отсутствии лопаток в зоне чувствительности ОВТД. В результате её работы вычисляются и сохраняются в энергонезависимой памяти параметры настройки на реальный сигнал, необходимые для дальнейшей пороговой обработки.

Начало процесса пороговой обработки входного потока при вращении рабочего колеса инициируется подачей команды от ПЭВМ верхнего уровня. При получении этой команды производится сортировка отсчетов входного потока в целях выделения полезных сигналов от дифференциальной ИЦ в составе ПР с ОВТД₁ и ОВТД₂, применение операции сжатия по адаптивным порогам в режиме «прямой ход» и сохранение результирующего массива в ОЗУ микроконтроллера. После ввода информации о заданном числе лопаток выполняется операция сжатия в режиме «обратный ход» над массивом данных в ОЗУ.

Подготовленный к передаче массив полезных кодов дополняется информацией о числе отсчетов и контрольной сумме. Данные передаются через последовательный порт UART в ПЭВМ верхнего уровня и становятся доступными для дальнейшей обработки.

6.2.2. Программное обеспечение верхнего уровня

ПО верхнего уровня системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в турбине реализовано в виде SDI-приложения (Single Document Interface) и работает под управлением операционной системы семейства MS Windows. Основными функциями ПО являются: управление запуском процедур сбора и пороговой обработки входного потока данных с результатами преобразования сигналов ОВТД, реализуемых в микроконтроллере; организация обмена данными между микроконтроллером и ПЭВМ; выделение лопаток в исходном массиве данных, нахождение экстремумов функций изменений кодов в каналах ОВТД; вычисление искоемых координат x, y смещений торцов лопаток, а также отображение и сохранение измерительной информации в базе данных эксперимента.

На рис. 6.2 представлена основная экранная форма приложения, обеспечивающая программный запуск процесса измерения в «старт-стопном» режиме, а также отображение измерительной и

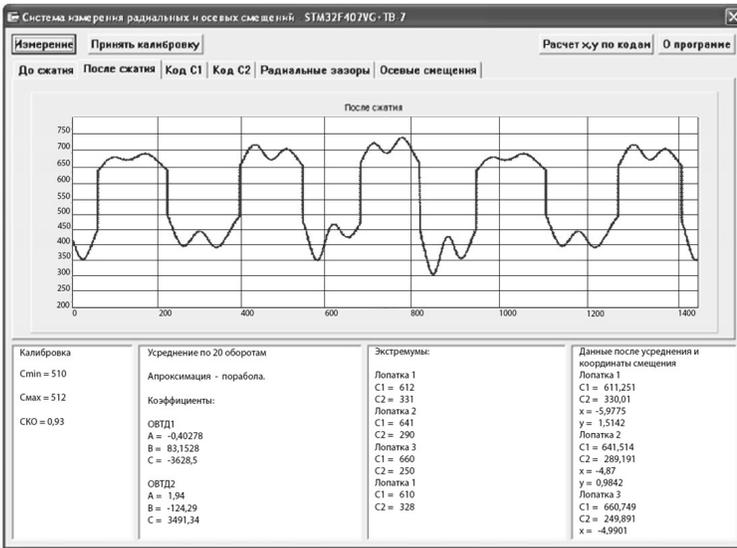


Рис. 6.2. Основная экранная форма приложения

служебной информации в графическом и текстовом виде. Следует отметить, что пользовательский интерфейс ПО предполагает отображение информации в значительно более расширенном виде, чем того требует применение системы в реальных условиях измерения. Целью такого усложнения была необходимость проверки работоспособности всех этапов сбора и обработки экспериментальных данных на рабочих режимах функционирования системы и отладка (в случае необходимости) разработанного алгоритмического обеспечения (см. раздел 4).

Запуск измерений осуществляется в ручном режиме по команде оператора путём нажатия виртуальной кнопки «Измерение», расположенной в верхней левой части экрана основной формы программы. При этом открывается диалоговое окно настроек (рис. 6.3), в котором пользователю предлагается задать объём анализируемой выборки кодов за целое число оборотов, выбрать реализуемый в системе метод измерения (*meth 1* или *meth 2*), режим обработки данных и выбор способа аппроксимации выборок кодов, задать параметры порта приёма-передачи данных от микроконтроллера и ряд других параметров.

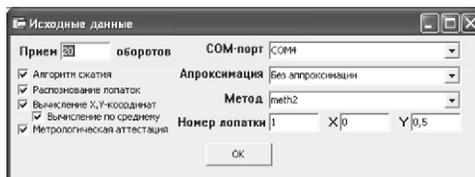


Рис. 6.3. Окно настроек программы

Нажатие виртуальной клавиши «ОК» диалогового окна рис. 6.3 инициирует процесс измерения, который начинается с формирования стартового импульса для внешних систем предварительной обработки цифровых кодов. Упакованный массив кодов с результатами измерений передаётся в ПЭВМ, где в соответствии с заданными при конфигурировании настройками происходит его дальнейшая обработка, включая выделение «лопаток» в исходном массиве данных, нахождение экстремумов методом прямого поиска без аппроксимации или вычисление экстремумов на основе аппроксимации зоны экстремума квадратичной параболой или полиномом Чебышёва; привязка результатов к конкретным лопаткам на рабочем колесе; вычисление искомым координат x, y смещений торцов лопаток и усреднение результатов по заданному числу оборотов.

Результаты измерений в виде графиков зависимостей экстремумов кодов C_1 и C_2 от номера оборота, вычисленных радиальных и осевых смещений торцов лопаток выводятся на экран монитора (см. рис. 6.2). Помимо указанной информации в ПО предусмотрена возможность вывода необработанных первичных данных с результатами измерений, полученных от микроконтроллера как до сжатия с использованием алгоритма, описание которого приведено в разделе 4.2, так и после него.

В нижних текстовых полях главного окна программы выводится служебная информация, содержащая количество элементов сжатого и несжатого массива данных, коэффициент сжатия, СКО, среднее значение кодов C_0 и ещё ряд промежуточных сведений (коэффициенты полинома аппроксимации по каждой лопатке, значения экстремумов кодов, найденные с использованием заданного алгоритма аппроксимации и без него, усредненные значения кодов C_1 и C_2 и координат x, y смещений торцов лопаток, оценка систематической и случайной составляющей погрешности измерения).

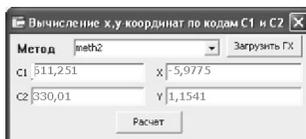


Рис. 6.4. Окно тестирования алгоритма вычисления x, y -координат

В отладочных целях в ПО системы предусмотрены режимы калибровки и тестирования алгоритма вычисления x, y -координат, запуск которых осуществляется при нажатии соответствующих виртуальных клавиш в основном окне программы.

Режим калибровки обеспечивает накопление контроллером нижнего уровня выборки кодов фиксированного размера без какой-либо предварительной обработки, а также вычисление по этой выборке среднего значения кода и дисперсии шума. Реализация указанного режима в статике, в условиях отсутствия вращения рабочего колеса, позволила проанализировать при помощи сторонних программ суммарный шум ИЦ и АЦП микроконтроллера, а его реализация в динамике (при вращающемся рабочем колесе) — проверить корректность работы алгоритмов предварительной обработки и сжатия данных.

При выборе режима тестирования алгоритма вычисления x, y -координат смещений торцов лопаток запускается диалоговое окно, представленное на рис. 6.4, в котором для заданных (введённых с клавиатуры) значений кодов C_1 и C_2 и загруженной в памяти ПЭВМ ГХ измерительного канала осуществляется расчёт радиальных и осевых смещений торца лопатки в соответствии с алгоритмом, описание которого приведено в разделе 4.4.

Накопленные результаты измерений автоматически сохраняются в долговременной памяти системы в виде текстовых файлов (MS DOS Text) и доступны для дальнейшего анализа и обработки с помощью стороннего ПО.

6.3. Результаты экспериментальных исследований

Приводятся результаты экспериментальных исследований системы измерения радиальных и осевых смещений (координат x, y), в которой реализованы *meth 1* и *meth 2*. При этом в первой части настоящего раздела рассматриваются метрологические показатели в статическом состоянии объекта измерения (контролируемой ло-

патки), а во второй — работоспособность системы в динамике (в процессе вращения контролируемой и соседних лопаток).

6.3.1. Метрологические показатели

Исследуются наиболее значимые показатели — систематические и случайные составляющие погрешностей.

Систематические составляющие погрешности. В работе [2], посвященной кластерным методам и средствам измерения многомерных смещений торцов лопаток, предлагается аппроксимация ГХ полиномиальными функциями нескольких переменных, которые в дальнейшем используются для расчета искомым координат методом Ньютона. Однако применение метода возможно только в тех случаях, когда ГХ монотонны в диапазонах изменений искомым координат. Между тем ГХ (зависимости цифровых кодов АЦП на выходе ИЦ ($C_1(x, y)$, $C_2(x, y)$)), как правило, монотонны в системе, реализующей *meth* 1. А это означает, что, согласно [59], аппроксимированные ГХ можно использовать как «опорные» для определения систематической составляющей погрешности, которая находится как разность кодов, полученных экспериментально (C) и после аппроксимации (C_a) при заданных значениях координат x и y ¹:

$$\Delta C = C - C_a. \quad (6.1)$$

Семейство ГХ определяется экспериментально, с помощью трёхкоординатного градуировочного устройства, оснащенного механическими индикаторами часового типа с разрешающей способностью 10 мкм [1].

Индикаторы контролируют перемещение лопатки, закрепленной на подвижной платформе². Методика получения ГХ предусматривала предварительную установку заданных координат x и y , ручной поиск экстремального значения кода C_1 , полученного после операции усреднения на нижнем уровне системы и выведенного на цифровой индикатор (усреднение устраняет влияние случайной составляющей погрешности). Далее процедура повторяется для новых

¹ Следует отметить, что в такой редакции систематическая составляющая — это фактически погрешность аппроксимации.

² Лопатка в целом аналогична тем лопаткам, которые использовались в экспериментах, результаты которых приведены в разделах 2 и 3, но отличается шириной и высотой выступов.

значений координаты x в диапазоне ее изменения (при неизменном значении y), а затем и для всех остальных значений координат y .

Аналогичным образом определяются и коды C_2 . Полученные результаты представлены в табл. 6.1 и использовались как исходные данные для определения аппроксимирующей функции степенного полинома с двумя переменными (x, y) вида:

$$C = f(x, y) = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J A_{j,i} x^i y^j, \quad (6.2)$$

где $A_{j,i}$ — коэффициенты; I, J — степени полинома.

Таблица 6.1. Семейство ГХ $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ (meth 1)

$C_1(x, y)$				$C_2(x, y)$			
$x, \text{ мм}$	$y, \text{ мм}$			$x, \text{ мм}$	$y, \text{ мм}$		
	0,5	1,0	1,5		0,5	1,0	1,5
-1,0	631	579	550	-1,0	407	443	464
-0,8	629	578	549	-0,8	411	446	465
-0,6	627	576	549	-0,6	416	449	467
-0,4	624	574	547	-0,4	421	452	469
-0,2	622	573	546	-0,2	426	454	470
0	619	572	545	0	431	457	472
0,2	616	570	544	0,2	435	460	474
0,4	612	568	543	0,4	441	463	476
0,6	609	565	541	0,6	446	466	477
0,8	605	563	540	0,8	450	468	479
1,0	600	561	539	1,0	454	471	481

На рис. 6.5 в графическом виде представлены результаты аппроксимации — полиномиальные функции $C_{a1}(x, y)$ и $C_{a2}(x, y)$ (степень $I = 3, J = 9$)¹.

¹ Коэффициенты полинома $C_{a1}(x, y)$ равны: $A_{00}=687,0843490787$; $A_{01}=-26,6865075213$; $A_{02}=-16,4022344132$; $A_{03}=-27,0592275501$; $A_{04}=114,1402335593$; $A_{05}=179,1269102115$; $A_{06}=-231,8118143574$; $A_{07}=-282,2472752341$; $A_{08}=127,9851631596$; $A_{09}=131,8661000945$; $A_{10}=-156,1468747769$; $A_{11}=28,0019831532$; $A_{12}=3,9070596466$; $A_{13}=66,4048882487$; $A_{14}=-152,5006275011$; $A_{15}=-438,1872796558$; $A_{16}=378,6153234704$; $A_{17}=683,3355050687$; $A_{18}=-224,8663614939$; $A_{19}=-317,5550968158$; $A_{20}=40,9547727716$; $A_{21}=-9,2738090446$; $A_{22}=4,3054413254$; $A_{23}=-24,0079444374$; $A_{24}=54,5443897911$; $A_{25}=155,1649645119$; $A_{26}=-158,7291955105$; $A_{27}=-224,7644365561$; $A_{28}=98,9208028412$; $A_{29}=96,8812255269$.

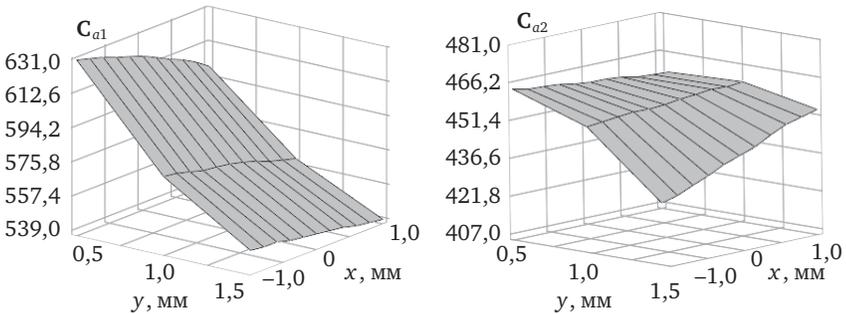


Рис. 6.5. Аппроксимирующие функции $C_{a1}(x, y)$ и $C_{a2}(x, y)$ (meth 1)

Приведенная систематическая составляющая погрешности имеет вид:

$$\delta_C = \frac{\Delta C}{\Delta C_{\max}} \cdot 100\%, \quad (6.3)$$

где ΔC определяется с помощью выражения (6.1), $\Delta C_{\max} = 512$ — максимально возможное изменение кода в ИЦ, причем ΔC вычисляется по кодам C_1 и C_2 при координатах x и y в «узлах» табл. 6.1 и кодам C_{a1} и C_{a2} при тех же значениях координат с помощью выражения (6.1). Результаты расчета функций $\delta_{C1}(x, y)$ и $\delta_{C2}(x, y)$ представлены на рис. 6.6.

Из графиков рис. 6.6 следует, что погрешности δ_C невелики и их максимальные значения не превышают 0,06%. Вместе с тем известно, что погрешности аппроксимации при использовании степенных полиномов в промежутках между «узлами» могут быть намного больше, чем в самих «узлах».

Чтобы дать количественную оценку таким погрешностям, были проведены дополнительные эксперименты, в ходе которых опреде-

При тех же значениях степени коэффициенты полинома $C_{a2}(x, y)$ имеют вид: $A_{00}=393,3221113283$; $A_{01}=25,3432524368$; $A_{02}=-7,4708016983$; $A_{03}=209,6388867605$; $A_{04}=27,6602012599$; $A_{05}=-814,254304691$; $A_{06}=-41,9246657572$; $A_{07}=1178,7214375499$; $A_{08}=21,4158449018$; $A_{09}=-562,449272058$; $A_{10}=86,0393383629$; $A_{11}=-8,5297583123$; $A_{12}=15,6988268010$; $A_{13}=-411,7518784297$; $A_{14}=-20,5017673032$; $A_{15}=1659,0714364315$; $A_{16}=-10,0276513317$; $A_{17}=-2464,6581275855$; $A_{18}=14,7871291119$; $A_{19}=1194,8683279005$; $A_{20}=-22,4637467757$; $A_{21}=-0,8293668474$; $A_{22}=-3,1045363264$; $A_{23}=172,8643371145$; $A_{24}=-18,1720569271$; $A_{25}=-721,2096166660$; $A_{26}=55,3956491627$; $A_{27}=1095,403630834$; $A_{28}=-33,6534688684$; $A_{29}=-538,2289844373$.

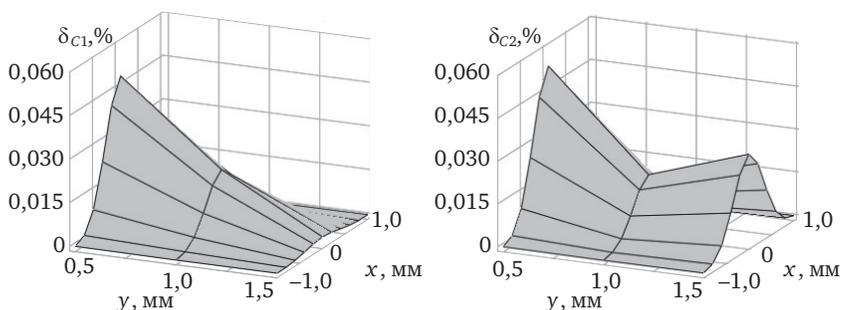


Рис. 6.6. Систематические составляющие погрешностей $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$, вычисленные в «узлах» табл. 6.1 (*meth 1*)

лялись значения кодов C_1 и C_2 при координатах x и y , выбранных в центрах промежутков между соответствующими координатами, приведенными в табл. 6.1. Полученные результаты представлены в табл. 6.2, а затем для тех же координат вычислены коды C_{a1} и C_{a2} , погрешности ΔC и δ_C (выражения (6.2), (6.1) и (6.3) соответственно). Графики $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$ изображены на рис. 6.7, и, как видно из графиков, максимальное значение приведенной погрешности не превышает 0,4%.

Далее рассматриваются результаты оценки систематической составляющей погрешности ИЦ в системе, реализующей *meth 2*. Как отмечалось ранее (см. раздел 3), ФП таких ИЦ немонотонны и, как следствие, можно ожидать немонотонность соответствующих ГХ. Но это означает, что применение метода Ньютона невозможно, а потому для вычисления координат x и y в разделе 4.4 предлагается алгоритм, свободный от указанного ограничения.

Как было показано в разделе 5.4, точность расчета координат x и y будет тем выше, чем меньше шаг изменений координат в экспериментах по определению семейства ГХ. Но это увеличивает трудоемкость процедуры градуировки и временных затрат, которые в конечном счете могут оказаться неприемлемыми, например в практике экспериментальных исследований ГТД.

В этой связи одним из возможных способов преодоления подобных трудностей является аппроксимация ГХ, полученных с достаточно большим и приемлемым для пользователей шагом, с последующим использованием аппроксимированных функций для нового

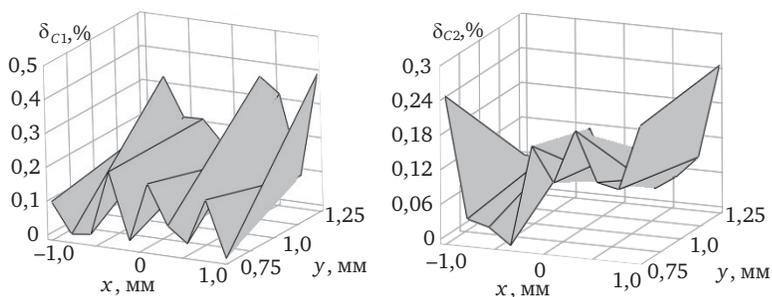


Рис. 6.7. Приведенные составляющие систематических погрешностей $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$, вычисленные в промежутках между «узлами» табл. 6.1 (*meth 1*)

Таблица 6.2. Коды C_1 и C_2 для оценки систематической составляющей погрешностей в промежутках между «узлами» (*meth 1*) (дополнение к табл. 6.1)

$C_1(x, y)$			$C_2(x, y)$		
$x, \text{ мм}$	$y, \text{ мм}$		$x, \text{ мм}$	$y, \text{ мм}$	
	0,75	1,25		0,5	1,25
-0,9	601	562	-0,9	430	456
-0,7	599	561	-0,7	433	458
-0,5	597	560	-0,5	437	461
-0,3	595	559	-0,3	441	463
-0,1	593	557	-0,1	444	465
0,1	591	556	0,1	448	467
0,3	588	555	0,3	451	469
0,5	586	553	0,5	455	472
0,7	583	551	0,7	459	474
0,9	580	549	0,9	462	475

табличного представления ГХ с достаточно малым шагом для дальнейшего расчета искомых координат¹.

Вместе с тем наличие аппроксимирующей функции позволяет найти систематические составляющие погрешности, применяя действия, аналогичные тем, что использовались выше в предположении реализации *meth 1*.

¹ При этом следует иметь в виду, что характерные для степенных полиномов увеличения погрешностей между «узлами» могут быть причиной снижения точности вычисления искомых координат. Поэтому необходимы дополнительные исследования и получение количественных оценок точности выбранного способа.

Семейство ГХ ($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$) для *meth 2* представлено в табл. 6.3. Полученные результаты использовались как исходные данные при определении аппроксимирующей функции, в качестве которой, как и в случае с *meth 1*, выбран полином в виде выражения (6.2)¹.

Данные табл. 6.3, а также полученные аппроксимирующие функции (рис. 6.8) позволяют найти (с помощью выражений (6.1) и (6.2)) приведенные значения систематической составляющей погрешности в «узлах» табл. 6.3. Графики погрешностей $\delta_{C1}(x, y)$ и $\delta_{C2}(x, y)$ приведены на рис. 6.9. Как следует из графиков на рис. 6.9, максимальные значения δ_{C1} и δ_{C2} не превышают 0,04%.

Таблица 6.3. Семейство ГХ $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ (*meth 2*)

$C_1(x, y)$				$C_2(x, y)$			
x, мм	y, мм			x, мм	y, мм		
	0,5	1	1,5		0,5	1	1,5
-5	548	530	518	-5	358	416	450
-4	578	547	528	-4	315	392	436
-3	612	566	540	-3	271	369	424
-2	651	588	553	-2	236	352	414
-1	692	609	564	-1	215	341	408
0	732	628	574	0	213	340	406
1	761	641	581	1	222	344	408
2	773	646	584	2	231	348	410
3	772	646	584	3	242	354	412
4	758	640	582	4	262	363	417
5	752	635	579	5	287	375	424

¹ Числовые значения параметров полинома $C_{a1}(x, y)$ со степенями $I = 3, J = 9$ равны: $A_{00} = 885,9454$; $A_{01} = 67,63532$; $A_{02} = -9,22836$; $A_{03} = -3,90459$; $A_{04} = 0,347141$; $A_{05} = 0,282234$; $A_{06} = -0,01921$; $A_{07} = -0,01321$; $A_{08} = 0,000458$; $A_{09} = 0,000245$; $A_{10} = -357,802$; $A_{11} = -74,2762$; $A_{12} = 7,878453$; $A_{13} = 4,525413$; $A_{14} = -0,25841$; $A_{15} = -0,25842$; $A_{16} = 0,017861$; $A_{17} = 0,00935$; $A_{18} = -0,00049$; $A_{19} = -0,00015$; $A_{20} = 99,85542$; $A_{21} = 23,42063$; $A_{22} = -1,74332$; $A_{23} = -1,49082$; $A_{24} = 0,010557$; $A_{25} = 0,071933$; $A_{26} = -0,00228$; $A_{27} = -0,00177$; $A_{28} = 0,000102$; $A_{29} = 1,93E-05$.

Для полинома $C_{a2}(x, y)$: $A_{00} = 25,45829093$; $A_{01} = 9,263095278$; $A_{02} = 10,53153351$; $A_{03} = -3,445304259$; $A_{04} = -0,396505741$; $A_{05} = 0,18524306$; $A_{06} = 0,025332172$; $A_{07} = -0,003025794$; $A_{08} = -0,000559994$; $A_{09} = -8,2672E-06$; $A_{10} = 435,775163$; $A_{11} = -7,53571438$; $A_{12} = -11,8225264$; $A_{13} = 1,91603842$; $A_{14} = 0,60592965$; $A_{15} = 0,13802082$; $A_{16} = -0,03870399$; $A_{17} = -0,0187996$; $A_{18} = 0,00083542$; $A_{19} = 0,0004547$; $A_{20} = -121,3071078$; $A_{21} = 1,087301635$; $A_{22} = 3,980473999$; $A_{23} = 0,065233655$; $A_{24} = -0,267354661$; $A_{25} = -0,166087958$; $A_{26} = 0,016933265$; $A_{27} = 0,01385582$; $A_{28} = -0,000355054$; $A_{29} = -0,000303131$.

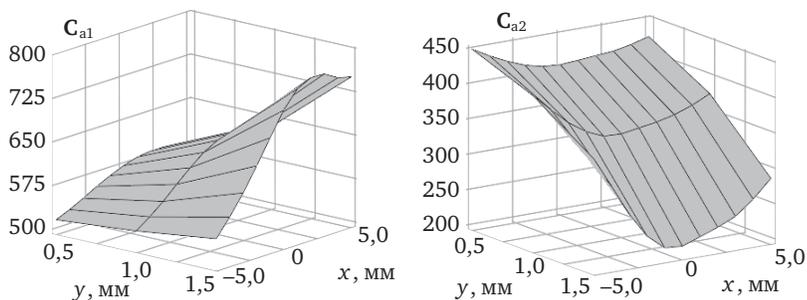


Рис. 6.8. Аппроксимирующие функции $C_{a1}(x, y)$ и $C_{a2}(x, y)$ (meth 2)

Чтобы найти погрешности в промежуточных точках табл. 6.3, проводится дополнительный эксперимент, результаты которого приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4. Коды C_1 и C_2 для оценки систематической составляющей погрешностей в промежутках между «узлами» (meth 2) (дополнение к табл. 6.3)

$C_1(x, y)$			$C_2(x, y)$		
x, мм	y, мм		x, мм	y, мм	
	0,75	1,25		0,5	1,25
-4,5	548	530	-4,5	376	430
-3,5	572	540	-3,5	343	412
-2,5	599	560	-2,5	314	396
-1,5	628	576	-1,5	294	385
-0,5	655	591	-0,5	289	379
0,5	682	602	0,5	287	379
1,5	694	608	1,5	296	382
2,5	698	610	2,5	299	385
3,5	693	608	3,5	310	389
4,5	685	603	4,5	326	397

Последующие действия аналогичны тем, что предпринимались для meth 1. Результаты вычислений в графическом виде представлены на рис. 6.10.

Из графиков видно, что максимальные значения погрешностей δ_{C1} и δ_{C2} не превышают 1,2%.

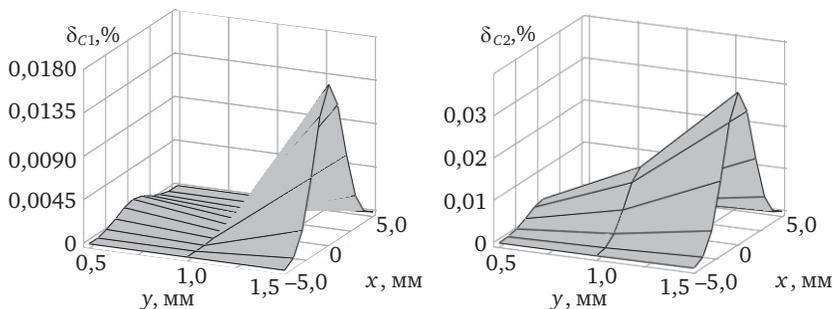


Рис. 6.9. Приведенные составляющие систематических погрешностей $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$ в «узлах» табл. 6.3 (*meth 2*)

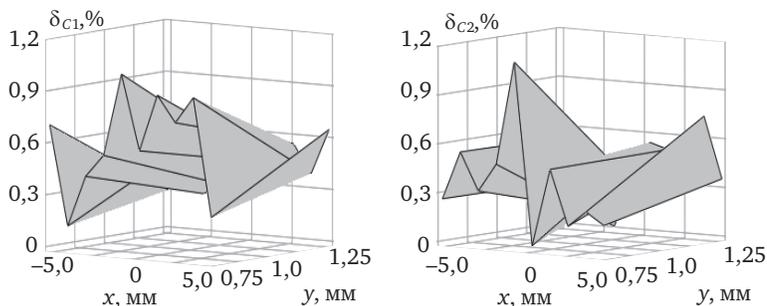


Рис. 6.10. Приведенные составляющие систематических погрешностей $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$, вычисленные в промежутках между «узлами» табл. 6.3 (*meth 2*)

Оценки случайной составляющей погрешности. Эксперименты по оценке случайной составляющей погрешности проводились в статике при фиксированных позициях лопатки относительно датчиков. Объем выборки определялся объемом буферной памяти. Коды АЦП регистрировались в режиме непрерывного импульсного питания ИЦ и оценивался их разброс (отклонение кодов от средних значений).

На рис. 6.11 в качестве примера представлен фрагмент выборки объемом 105 кодов (C_1) (при использовании *meth 2*). Там же в увеличенном масштабе изображен разброс кодов C_1 . Анализ показал, что большая часть кодов не вышла за пределы разброса в ± 2 единицы. Среднеквадратическое отклонение (СКО) составило 1,03. Его относительное значение, приведенное к диапазону изменений выходных кодов (512), составляет около 0,2%.

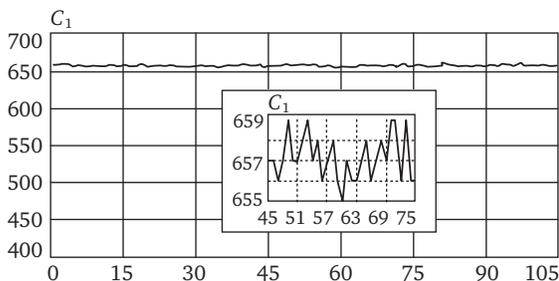


Рис. 6.11. Фрагменты выборки кодов C_1 при $x = -2$; $y = 0,5$ мм (*meth 2*)

Аналогичные эксперименты были проведены для кодов C_2 , а также для кодов C_1 и C_2 , применительно к *meth 1*. СКО незначительно отличалось (0,93), а его относительное значение также можно считать приблизительно равным 0,2%.

6.3.2. Оценка работоспособности

Приводится описание имитатора объекта, обеспечивающего вращательное движение лопаток относительно ОВТД₁ и ОВТД₂ в составе РК, что позволяет дать оценки работоспособности технических и программных средств системы в целом и, в частности, программ, реализующих алгоритмы предварительной обработки информации, вычисления экстремальных значений кода, а также радиальных и осевых смещений торцов лопаток.

Имитатор объекта. Содержит имитатор рабочего колеса (ИРК) и имитатор статора (ИС). ИРК представляет собой диск с тремя турбинными лопатками, одна из которых использовалась в метрологических экспериментах, две остальные подобны первой по форме и размерам. Лопатки размещены на диске с угловым шагом 120°. Электрический привод обеспечивает вращение диска с регулируемой скоростью (от 60 до 1000 об/мин). ИС представляет собой крепежное устройство для РК (ОВТД₁ и ОВТД₂) с механизмом перемещения обоих датчиков в направлении осей X и Y , причем контроль этих перемещений осуществляется индикаторами часового типа с разрешающей способностью до 0,01 мм. Топология размещения ЧЭ ОВТД в составе РК и их ориентация относительно оси Z (направление вращения ИРК) соответствует *meth 1* или *meth 2* (в зависимости от выбора).

Оценка работоспособности алгоритмов предварительной обработки информации и вычисления экстремальных значений кодов. Все исследования проводились в динамике, т.е. в процессе вращения ИРК в течение одного периода. При этом радиальные и осевые смещения были установлены с помощью соответствующих индикаторов [0,8 мм (y), 0 (x) (*meth 1*) и 0,8 мм (y), -2 мм (x) (*meth 2*)] и оставались неизменными в течение эксперимента при постоянной скорости вращения (500 об/мин).

На рис. 6.12 представлены результаты эксперимента при использовании в системе *meth 1* — это зависимости кодов на выходе АЦП в течение полного оборота ИРК (при прохождении каждой из трех лопаток ЧЭ обоих датчиков) от номера отсчета N , соответствующего текущему времени (при постоянной частоте импульсного питания ИЦ с периодом $T_{\text{п}} = 9 \cdot 10^{-6}$ с). Коды остаются постоянными в межлопаточном пространстве (без учета шумовой составляющей).

Избыточность, связанная с этими кодами, устраняется в процессе предварительной обработки (рис. 6.12, б), завершает которую адаптивное сжатие (см. раздел 4.2, рис. 6.12, в). Перечисленные операции позволяют уменьшить объем данных, передаваемых на верхний уровень, почти на порядок.

На рис. 6.13 в увеличенном масштабе изображена функция $C_1(N)$ после сжатия, где отчетливо просматривается действие случайных помех. Для количественной оценки помех область $C_1(N)$ в зоне экстремума вынесена на «апликацию». Кроме того, на том же рисунке (в том числе и на «апликации») представлена аппроксимирующая функция в виде полинома Чебышёва I рода (см. раздел 4.3).

Можно утверждать, что экстремум аппроксимации, где происходит сглаживание помехи, является более достоверным, чем экстремум, найденный без использования аппроксимации (разница между ними достигает примерно двух единиц кода — около 0,4% от максимально возможной девиации (512)).

Аналогичные эксперименты были проведены в предположении использования в системе *meth 2*. Их результаты представлены на рис. 6.14 и 6.15.

Отличительной особенностью зависимостей $C(N)$ (см. рис. 6.14) от тех, что представлены на рис. 6.12, является наличие двух экстремумов, один из которых согласно *meth 2* информативный (при прохождении лопаткой ЧЭ ОВТД₁ — C_1 , ЧЭ ОВТД₂ — C_2).

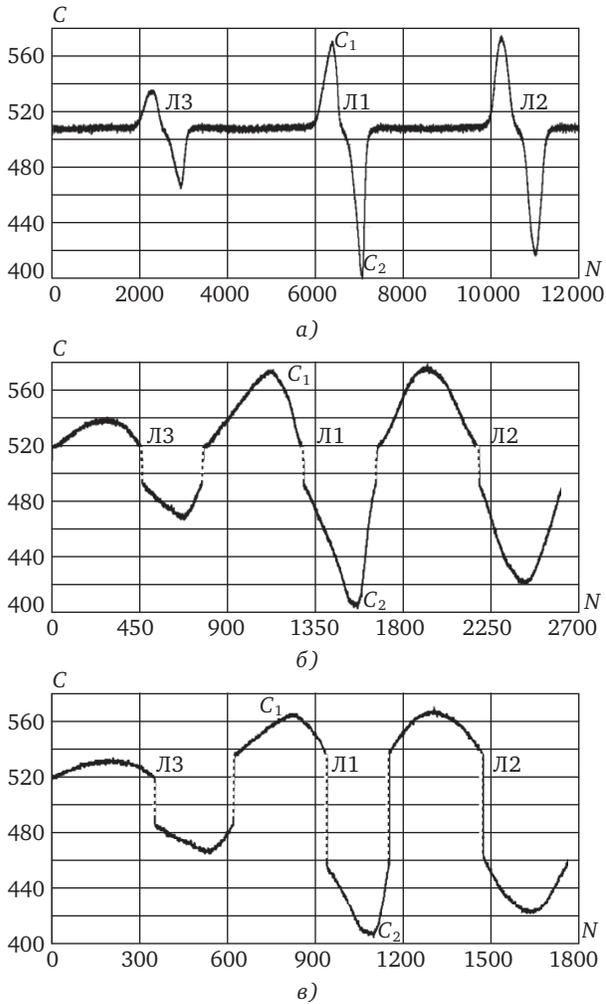


Рис. 6.12. Коды на выходе АЦП (а), после устранения избыточности в межлопаточном пространстве (б) и применения адаптивного сжатия (в) (*meth 1*)

На рис. 6.15 показана зависимость $C(N)$ в области экстремума в увеличенном масштабе, где так же, как и на рис. 6.13, отчётлива видна помеха. Дополнительное увеличение масштаба (см. «апли-

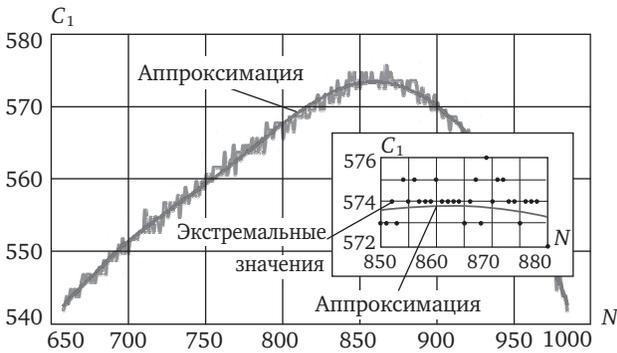


Рис. 6.13. Функция $C_1(N)$ и ее экстремальные значения с использованием аппроксимации и без неё (meth 1)

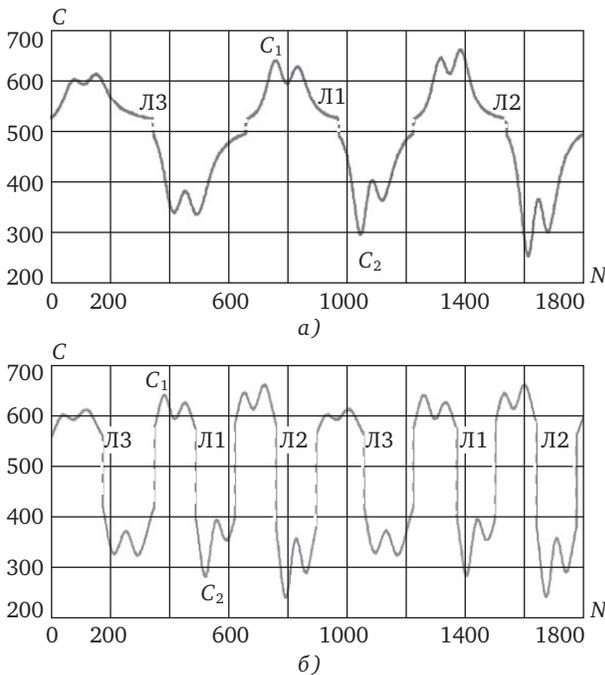


Рис. 6.14. Устранение избыточности кодов в межлопаточном пространстве (а) и применение адаптивного сжатия (б) (meth 2)



Рис. 6.15. Функция $C_1(N)$ и ее экстремальные значения с использованием аппроксимации и без неё (*meth 2*)

кацию») позволяет определить экстремальное значение кода (659) и продемонстрировать аппроксимацию параболой (см. раздел 4.3), проходящей через три точки — экстремум и точки ниже экстремума примерно на 8 единиц (эти точки обведены пунктиром).

При этом разность между экстремальными значениями составляет менее единицы кода (менее 1%). Представляется очевидным, что выявленный разброс экстремальных значений кодов, связанный с помехами, может быть существенно уменьшен, если использовать предусмотренное в системе усреднение данных за несколько оборотов ИРК. Можно ожидать, что даже четырех оборотов достаточно для уменьшения погрешности примерно в два раза, а на двадцати — более чем в четыре.

Оценка работоспособности системы в целом и алгоритма вычислений радиальных и осевых смещений торцов лопаток в частности. Эти оценки являются итоговыми и, как и предыдущие, производятся дважды — в предположении использования в системе *meth 1* и *meth 2*.

Для получения семейств ГХ достаточно одной лопатки при наличии градуировочного устройства, обеспечивающего линейные перемещения лопатки по трем координатам (x, y, z) и их измерения. При этом предполагается, что диаметр рабочего колеса турбины достаточно велик, чтобы считать траекторию вращения торцов лопаток в направлении оси Z на отрезке длиной 20...30 мм практически линейной. Тогда при дополнительном условии применения аналогичных лопаток на рабочем колесе можно воспользоваться метро-

логически состоятельными семействами ГХ, полученными в разделе 6.3.1 (см. табл. 6.1 и 6.3) в рабочем режиме системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток. Однако ИРК имеет сравнительно небольшой диаметр (около 215 мм) и на указанном выше отрезке траекторию вращения нельзя считать линейной, а потому применение имеющихся семейств ГХ не представляется возможным.

Вместе с тем в имитаторе объекта предусмотрена возможность контролируемых индикаторами перемещений ИС (с закрепленным на нем РК ОВТД) в направлении осей X и Y относительно ИРК, а следовательно, и относительно торцов установленных на нем лопаток. Если при этом ИРК будет приведен во вращение и торцы лопаток будут периодически проходить зону чувствительности обоих датчиков в направлении оси Z , а система измерения обеспечит фиксацию экстремальных значений кодов C_1 и C_2 , а также их вывод пользователю, то имитатор объекта можно использовать, в частности, как своеобразное градуировочное устройство для получения семейств ГХ.

В то же время необходимо подчеркнуть, что изготовление ИС и ИРК осуществлялось на лабораторном оборудовании по упрощенным технологиям в условиях серьезных финансовых ограничений и без какой-либо официальной аттестации, гарантирующей метрологическую состоятельность результатов экспериментов с применением имитатора объекта. Это означает, что в настоящей работе вопросы, связанные с точностью средств измерения и обработки данных, ограничены материалами теоретических исследований, изложенных в разделе 5, а также экспериментальными исследованиями систематической и случайной составляющей погрешностей ИЦ в разделе 6.3.1.

Что же касается имитатора объекта, то его применение может быть связано только с оценками работоспособности аппаратно-программных средств системы, включая завершающую программу, реализующую алгоритм вычисления координат смещения торцов лопаток.

Методика решения такой задачи предполагает ряд последовательных операций: получение семейства ГХ с помощью имитатора объекта (в динамике, т.е. при вращении ИРК), ввод полученных ГХ в систему (как исходные данные для расчета x, y -координат), уста-

новку и ввод тестовых значений координат x и y , а также их сравнение с полученными результатами вычислений тех же координат.

Для получения семейства ГХ с помощью индикаторов осуществлялась установка заданных значений координаты x в диапазонах 2 мм с шагом 0,2 мм (*meth 1*) и 10 мм с шагом 1 мм (*meth 2*), а координаты y в диапазоне 0,8 мм (от 0,8 до 1,6 мм с шагом 0,4 мм) для обоих методов¹. Для каждой пары из возможных сочетаний координат x и y в указанных диапазонах в процессе вращения ИРК для лопатки под номером 2 (Л2) определялись экстремальные значения кодов — максимум C_1 (рабочий ОВТД₁) и минимум C_2 (рабочий ОВТД₂) при использовании программ предварительной обработки кодов АЦП, поиска экстремальных значений и их усреднения на 20 оборотах ИРК. Полученные семейства ГХ-*meth 1*, как и ожидалось, монотонны, а ГХ-*meth 2* немонотонны. Но характер изменений функций $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ аналогичен тем, что представлены в табл. 6.1, и на рис. 6.5 (*meth 1*), а также в табл. 6.3 и на рис. 6.8 (*meth 2*). Поэтому ни в графическом, ни в табличном виде ГХ-*meth 1* и ГХ-*meth 2* здесь не представлены. В табличном виде данные обоих разновидностей семейств ГХ вводятся в систему для использования в программе, реализующей вычисление x, y -координат.

Далее в соответствии с предложенной методикой осуществляется подготовка тестовых значений координат x и y . С помощью индикаторов устанавливаются значения x, y , которые являются промежуточными между значениями, использованными при получении семейств ГХ-*meth 1* и ГХ-*meth 2* (между «узлами» таблиц ГХ).

Приводится во вращение ИРК, производится измерение, и полученные в цифровом виде результаты поступают в ПЭВМ, где с помощью программ предварительной обработки, поиска и вычисления экстремальных значений и их усреднения на двадцати оборотах, а также программы вычисления x, y -координат, рассчитываются координаты x и y .

В табл. 6.5, в предположении использования в системе как *meth 1*, так и *meth 2*, приводятся результаты исследований разности заданных и вычисленных в системе координат, выраженных в процентах от диапазонов их изменений (2 мм — *meth 1* и 10 мм — *meth 2*).

При этом по вертикали расположены заданные промежуточные значения координаты y (1,0 мм, как для *meth 1*, так и *meth 2*). По го-

¹ Минимальный РЗ (0,8 мм) увеличен по соображениям безопасности, чтобы избежать касания ЧЭ ОВТД торцами лопаток на ИРК в процессе его вращения.

Таблица 6.5. Разность заданных и вычисленных значений координат, выраженная в процентах от диапазонов их изменений

Метод	Заданные промежуточные значения координат										
	у, мм	\bar{x}									
		-0,9	-0,7	-0,5	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
<i>meth 1</i>	1,0	2,5	3,5	6,7	8,9	10,9	5,4	11,4	12,0	—	—
		3,75	3,75	3,75	2,5	2,5	1,25	1,25	1,25	—	—
<i>meth 2</i>	1,0	1,12	0,88	0,02	-0,12	2,4	1,6	-1,64	-0,2	0,32	-2,14
		5,5	4,0	2,5	2,5	2,5	1,0	5,0	2,5	-1,0	9,25

ризонтали одной строкой представлены заданные промежуточные значения x -координаты, выраженной в относительных единицах:

$$\bar{x} = \frac{x_{\text{зп}}}{0,5(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})},$$

где $x_{\text{зп}}$ — заданное промежуточное значение, мм (-0,9; -0,7...+0,5 для *meth 1*, а также -4,5; -3,5; ...+4,5 для *meth 2*), а $x_{\text{max}} = +1,0$ мм; $x_{\text{min}} = -1,0$ мм для *meth 1*; $x_{\text{max}} = +5,0$ мм; $x_{\text{min}} = -5,0$ мм для *meth 2*. Вычисленные значения разности, расположенные в «клетках» табл. 6.5, соответствуют парам выбранных тестовых значений заданных координат x и y , причем в тонированной части каждой «клетки» размещены разности заданных и вычисленных x -координат, а в нетонированных y -координат. Из данных, приведенных в табл. 6.5, следует, что разность заданных тестовых и вычисленных значений для *meth 1* по координате y (РЗ) не превышает 3,75%, по координате x (ОС) — 12%; для *meth 2* по y не более 5,5% (если не считать единичное значение разности около 10%), а по x — менее 2,4%.

По тем же семействам ГХ, полученным в динамике на лопатке Л2, проведены измерения на лопатках Л1 и Л3. Результаты измерений с использованием *meth 2* показали, что Л1 сдвинута относительно Л2 по координате x примерно на 1,0 мм, а по координате y — около 0,8 мм в сторону увеличения. Тот факт, что РЗ Л1 больше по сравнению с Л2, также заметен и на рис. 5.15 по соотношению экстремальных значений кодов. Кроме того, как следует из рис. 5.15, отличие экстремальных значений кодов Л2 и Л3 настолько велико, что коды, соответствующие Л3, выходят за пределы семейства ГХ, полученного на Л2, и это может свидетельствовать о недопустимо большом РЗ, позволяя диагностировать нештатную ситуацию.

Заключение к разделу 6

Разработаны технические и программные средства системы. В состав нестандартных технических средств входят ОВТД, ориентированные на применение в турбинах, причем в ОВТД встроены дополнительные ТП для коррекции погрешности измерения температуры ЧЭ, а сами ОВТД, в свою очередь, включены в ИЦ с приближенным дифференцированием и АЦП на выходе. Стандартные технические средства содержат устройство предварительной обработки на базе микроконтроллера с расширенным объемом памяти и повышенным быстродействием. В состав программного обеспечения включены новые разработки, реализующие алгоритмы адаптивного сжатия данных, поиска экстремальных значений кодов или их вычисления при использовании аппроксимирующих функций, алгоритм вычисления x, y -координат, а также вспомогательные программы поддержания функционирования системы в двух режимах, реализующих *meth 1* и *meth 2* (по выбору пользователя).

Проведены экспериментальные исследования системы измерения для оценки метрологических показателей (в статическом режиме) и работоспособности системы (в динамике). Даны количественные оценки наиболее значимых показателей — систематической и случайной составляющих погрешности. Показано, что систематическая составляющая погрешности, найденная как разность значений кодов ГХ, представленных в табличном виде, и полиномиальных функций двух переменных (x, y), аппроксимирующих ГХ, в «узлах» таблиц, не превышает 0,06%, а в промежутках между «узлами» — 0,4%. При этом приведенные оценки систематической составляющей погрешности получены в предположении использования *meth 1*. Показано также, что при использовании *meth 2* систематические составляющие погрешности возрастают в промежутках между «узлами» таблиц, достигая 1,2%, но остаются незначительными в «узлах» (менее 0,03%). Кроме того, в процессе экспериментальных исследований случайных погрешностей было установлено, что они составляют около 0,2% как для *meth 1*, так и для *meth 2*.

Разработан и изготовлен имитатор объекта, который содержит ИРК с тремя лопатками, предназначенными для применения в турбине, а также ИС с расположенным на нем РК из двух ОВТД. Имитатор объекта предназначен для оценки работоспособности аппаратно-программных средств системы, включая завершающую

программу, реализующую алгоритм вычисления координат смещения торцов лопаток (x, y).

Предложена методика такой оценки, предусматривающая ряд последовательных операций: получение ГХ с помощью имитатора объекта (в динамике, т.е. в процессе вращения ИРК), ввод табличных данных о ГХ (как исходных данных для расчета искомых координат), установку и ввод тестовых значений x, y -координат, а также их сравнение с полученными результатами вычислений тех же координат. Вместе с тем результаты сравнения в виде разности тестовых и вычисленных значений одноименных координат, выраженные в процентах от диапазонов изменений соответствующих координат, нельзя рассматривать как количественные оценки метрологических показателей системы, что связано с серьезными упрощающими допущениями и ограниченными технологическими возможностями изготовления ИРК и ИС, а также проведением исследований в динамическом режиме. Однако предложенная методика обеспечивает вполне достоверные оценки работоспособности всех компонентов аппаратно-программных средств и системы в целом. Показано, что разность заданных тестовых и вычисленных значений y -координаты ($P3$) при использовании в системе *meth 1* и *meth 2* незначительно отличаются друг от друга, не превышая 3,75 и 5,5% соответственно. Что же касается x -координаты, то разностные значения для *meth 2* в несколько раз меньше, чем для *meth 1* (2,4 и 12%), что связано с увеличенным диапазоном изменений x -координаты при использовании *meth 2*.

Список литературы

1. **Методы** и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. — Самара: Изд-во СамНЦ 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. **Кутейникова М.М., Райков Б.К., Скобелев О.П.** Конструктивные разновидности высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2012. С. 595—601.
4. **Хритин А.А.** Система измерения радиальных зазоров в турбомашинах: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.16. Самара, 1993. — 180 с.
5. **Пат. 2457432 РФ**, МКИ G 01 B 7/14. Способ измерения радиальных зазоров и осевых смещений торцов лопаток рабочего колеса турбины / Л.Б. Беленький, М.М. Кутейникова, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев. №2010154771/28; Заяв. 30.12.10; Опубл. 27.07.12, бюл. №21.
6. **Беленький Л.Б., Кутейникова М.М., Райков Б.К. и др.** Кластерный метод измерения радиальных и осевых смещений лопаток с уменьшением влияния некоторых мешающих факторов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIII междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2011. С. 294—299.
7. **Тулупова В.В.** Системы измерения многокоординатных смещений торцов лопаток компрессора и лопастей винтовентилятора: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.16. — Самара, 2005. — 200 с.

8. Пат. 2556297 РФ, МПК G01B7/14. Способ измерения радиальных зазоров и осевых смещений торцов рабочих лопаток турбины / М.М. Кутейникова, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев. № 2013147336/28; Заяв. 23.10.13; Опубл. 10.07.2015, бюл. № 19.

9. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К. и др. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Автометрия. — 2015. — № 3. — С. 104—112.

10. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипов П.Е. и др. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и результаты его исследований // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVII междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. — С. 683—684.

11. Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XII междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2010. — С. 323—327.

12. Кутейникова М.М. Вычисление координат смещения торцов лопаток в системе измерения радиальных зазоров // Управление большими системами. Материалы X Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Т. 3. — Уфа: УГАТУ, 2013. — С. 157—161.

13. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипов П.Е. и др. Эквивалентные параметры одновиткового вихретокового датчика в измерительной цепи с импульсным питанием // Датчики и системы. — 2016. № 2. — С. 27—35.

14. Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XV междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. — С. 627—635.

15. Секисов Ю.Н. Методы и средства измерений многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок: дисс. ... докт. техн. наук: 05.11.16. Самара, 1999. — 321 с.

16. Боровик С.Ю., Маринина Ю.В., Секисов Ю.Н. Модель кластерного одновиткового вихретокового датчика на основе метода конечных элементов // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». — 2007. № 1(19). — С. 76—83.

17. **Боровик С.Ю.** Кластерные методы и системы измерения деформаций статора и координат смещения торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях: дисс. ... докт. техн. наук: 05.11.16. — Самара, 2011. — 306 с.

18. **Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спириин Г.Г.** Курс общей физики. В 3 т. Т. 2. — М.: Высшая школа, 2003. — 438 с.

19. **Афанасьев Б.П., Гольдин О.Е. и др.** Теория линейных электрических цепей. — М.: Высшая школа, 1973. — 592 с.

20. **ГОСТ 23537—79.** Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения. — М.: Издательство стандартов, 1979. — 33 с.

21. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1977. — 832 с.

22. **Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с лопаткой сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XV междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. — С. 636—641.

23. **Беленький Л.Б., Скобелев О.П.** Электронный аналог измерительной цепи в виде моста Блумлейна с одновитковыми вихретоковыми датчиками // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIII междунар. конф. — Самара: СамНЦ РАН, 2011. — С. 300—304.

24. **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.

25. **Пат. 2525614 РФ, МПК G01B 7/14.** Устройство для измерения многокоординатных смещений торцов лопаток / Л.Б. Беленький, М.М. Кутейникова, А.В. Логвинов, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев. № 01/2012157903/28; Заяв. 27.12.12; Опубл. 20.08.2014, бюл. № 23.

26. **Беленький Л.Б., Логвинов А.В., Скобелев О.П.** Преобразователь индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков в цифровой код // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XV междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ

РАН, 2013. — С. 642—645.

27. **Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Улучшение симметрии дифференциальной измерительной цепи с приближенным дифференцированием для преобразования индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014. — С. 687—692.

28. **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. 687—691.

29. **Беленький Л.Б.** Влияние переменной во времени индуктивности одновиткового вихретокового датчика на результат преобразования измерительной цепи // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды IX междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2007. — С. 248—251.

30. **Беленький Л.Б.** Влияние изменений во времени индуктивности вихревого датчика на выходной сигнал измерительной цепи // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XI междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2009. — С. 338—342.

31. **Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Результаты моделирования измерительных цепей с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным дифференцированием // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014. — С. 692—696.

32. **Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипов П.Е. и др.** Верификация результатов моделирования измерительной цепи с одновитковыми вихретоковыми датчиками // Датчики и системы. — 2016. №3. — С. 9—15.

33. **PRODUCT SELECTION TABLES:** <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/ad-converters/products/index.html>.

34. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 1996. — 638 с.

35. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. — М.: Наука, 1972. — 256 с.

36. Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипов П.Е. Предварительная обработка данных кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы на основе адаптивного алгоритма // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVII междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. — С. 677—678.

37. Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М. Определение экстремума функции изменения кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVII междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. — С. 679—680.

38. А.с. 1550608 SU, МКИ Н 03 К 5/153. Устройство для фиксации момента прохождения задним фронтом импульса заданного уровня / В.Н. Белопухов, А.Н. Малов, В.Н. Подвигин. № 4332427/24-21; Заяв. 24.11.87; Опубл. 15.03.90, бюл. № 10.

39. Боровик С.Ю., Игначков С.М., Ильинский С.А. и др. Система измерения радиальных зазоров на закапотированной винтовентиляторной установке // Изв. Вузов. Авиационная техника. — 2004. № 3. — С. 77—79.

40. Носач В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. — М.: МИКАП, 1994. — 382 с.

41. Яковенко П.Г. Моделирование систем: учебное пособие. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. — 106 с.

42. Гутер Р.С., Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. — М.: Физматлит, 1962. — 356 с.

43. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. — М.: Высшая школа, 3-е изд., 2008. — 544 с.

44. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. — М.: Наука, 1971. — 192 с.

45. Калиткин Н.Н. Численные методы. — М.: Наука, 1978. — 512 с.

46. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипов П.Е. и др. Влияние соседних лопаток на измерение радиальных зазоров в тур-

бине // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2015. № 5. — С. 327—336.

47. **Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипнов П.Е. и др.** Моделирование процесса измерения радиальных и осевых смещений торцов рабочих лопаток сложной формы // Автометрия. — 2015. Т. 51. № 5. — С. 101—112.

48. **Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Погрешности системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в турбине // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVIII междунар. конф. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2016. — С. 444—447.

49. **Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Погрешность измерения температуры чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика в каналах термокоррекции системы сбора информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток и метод ее уменьшения // Вестник СамГТУ, Серия «Технические науки». — 2012. № 03(35). С. 43—49.

50. **Пат. 2519844 РФ**, МКИ G 01 B 7/14. Способ уменьшения температурной погрешности измерения многокоординатных смещений торцов лопаток одновитковым вихретоковым преобразователем / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев. № 2012133371/28; Заяв. 03.08.12; Оpubл. 20.06.14, бюл. № 17.

51. **Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К. и др.** Экспериментальная оценка погрешности измерения температуры чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». — 2014. № 01(41). — С. 38—43.

52. **Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Погрешности дискретизации в системах измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток рабочего колеса турбины // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». — 2016. № 02(50). — С. 83—90.

53. **Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.** Погрешности алгоритма вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы в системах измерения радиальных зазоров в турбине // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». — 2016. № 3 (51). — С. 45—54.

54. **Таблицы** физических величин: справочник / под ред. И.К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.
55. **Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К. и др.** Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, Автоматизация, Управление. — 2013. № 10. — С. 38—46.
56. **Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М. и др.** Измерение радиальных зазоров с повышенной чувствительностью в расширенном диапазоне осевых смещений рабочего колеса турбины // Мехатроника, Автоматизация, Управление. — 2017. Т. 18. № 4. — С. 246—256
57. **Datasheet:** <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>.
58. **ГОСТ Р МЭК 60715—2003.** Аппаратура распределения и управления низковольтная. Установка и крепление на рейках электрических аппаратов в низковольтных комплектных устройствах распределения и управления. — М: Госстандарт России, 2003. — 15 с.
59. **РМГ 29-2013 ГСИ.** Метрология. Основные термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2014.

Научное издание

БЕЛОПУХОВ ВАЛЕНТИН НИКОЛАЕВИЧ,
БОРОВИК СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ,
КУТЕЙНИКОВА МАРИНА МИХАЙЛОВНА
И ДР.

**Кластерные методы и средства
измерения радиальных зазоров
в проточной части турбины**

Редактор *Н.В. Дюбкова*
Корректор *М.Я. Барская*
Дизайнер переплета *В.В. Дёмкин*
Компьютерная верстка *В.В. Дёмкин*

Сдано в набор 24.10.18. Подписано в печать 20.11.18.
Формат 60×88 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура
Charter ГТС. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,0.
Уч.-изд. л. 13,58. Тираж 300 экз.

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»,
107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
www.mashin.ru

Отпечатано способом ролевой струйной печати
в АО «Первая Образцовая типография»
Филиал «Чеховский Печатный Двор»
142300, Московская обл., г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1

ISBN 978-5-907104-07-5

