

Если $j \leq k$, то переход к началу b шага, в противном случае перейти к шагу 7.

7. Конец работы алгоритма. Полученное значение min есть минимальное время восстановления входного вектора и множество окрашенных вершин соответствует множеству автоматов, которые будут задействованы в ходе этого восстановления.

Доказательство корректности алгоритма следует из того факта, что если автомат БПИ не имеет подавтоматов БПИ, то для восстановления какого-либо входного сигнала необходимо решать всю систему уравнений вида (3), для чего нужно знать все выходы автомата, вход которого нужно восстановить. Следовательно, неопределенность встречается только в узлах сети.

Предположим теперь, что в сети есть не только автоматы БПИ, но и автоматы с потерей информации. Тогда:

1. Пусть имеется ЛА \tilde{A} с l входами и m выходами, где $l > m$. Будем через \tilde{A}_j^l обозначать линейный подавтомат линейного автомата \tilde{A} , у которого наблюдение выходных сигналов ведется по каналам с номерами из множества $J = \{j_1, \dots, j_m\}$, а восстановление информации осуществляется по входным каналам с номерами из множества $I = \{i_1, \dots, i_v\}$. Следуя [2], ЛА \tilde{A} назовем ЛА ОБПИ, если у него существует подавтомат \tilde{A}_J^I , являющийся ЛА БПИ.

Тогда в графе ему будут соответствовать две вершины: а) вершина, соответствующая подавтомату БПИ; б) вершина, соответствующая остальной части автомата (так как в данном случае нас не интересует внутренняя структура автомата, а только возможность восстановления его входов по его

выходам, то мы можем с этой точки зрения “разделить” автомат на две части). Весовой коэффициент первой вершины будет равен времени восстановления входов подавтомата БПИ по его выходам; весовой коэффициент второй вершины будет равен стоимости дополнительной линии для восстановления значения тех входов автомата, которые нельзя восстановить по его выходам.

2. Если автомат с потерей информации не является автоматом ОБПИ, то в графе ему соответствует, как и в случае с автоматом БПИ, одна вершина, но ее весовой коэффициент складывается из стоимости введения дополнительных линий для восстановления входов и времени их восстановления.

В остальном граф строится так же, как и в для автоматов БПИ, и после его построения можно применять приведенный алгоритм.

Литература: 1. Гилл А. Линейные последовательностные машины. М.: Наука, 1974. 287 с. 2. Сперанский Д.В. Обобщенные линейные автоматы без потери информации // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. №1. С.166-172. 3. Сперанский Д.В. Об одной задаче для сетей из линейных автоматов без потери информации // Автоматика и телемеханика. 1999. №1. С. 140-147. 4. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Т.1. Основные алгоритмы. М.: Мир, 1976.

Поступила в редколлегию 30.11.2000

Рецензент: д-р техн. наук. проф. Сперанский Д.В.

Огнева Марина Валентиновна, канд. физ.-мат. наук, ассистент кафедры математической кибернетики и компьютерных наук Саратовского государственного университета. Научные интересы: теория автоматов, эксперименты с автоматами. Адрес: Россия, 410026, Саратов, Астраханская, 83, тел. 52-26-87.

ognevamv@info.sgu.ru, ognevamv@mail.ru.

УДК 620.179.13

О ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (АТНК) ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

МЕШКОВ С.Н., МЕЛЬНИК С.И.

Рассматриваются возможные подходы к созданию универсальной методики оптимизации проектирования средств и процедур АТНК на основе решения прямой задачи, частных методик оптимизации режимов контроля и основных характеристик регистрирующих устройств. Для решения этой задачи предлагается применять аппарат тепловых передаточных функций.

Введение

Тепловой неразрушающий контроль в последнее время все чаще используется как основной метод контроля промышленной продукции. Все большее число объектов и методик входят в арсенал тепловых методов. Это в первую очередь связано с

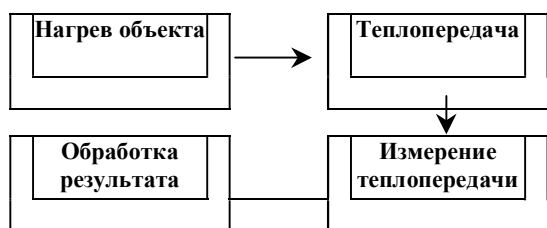
быстрым развитием измерительной техники: возникновение новых поколений тепловизоров, качество изображения в которых приближается к телевизионному стандарту, применение современных компьютерных методов обработки изображения, создание обширных баз данных термограмм поверхности. При этом стоимость программного обеспечения сравнима со стоимостью самого тепловизора [1]. Однако, несмотря на колоссальные возможности теплового метода, очень часто его используют лишь для индикации дефектов, а их дальнейшую дефектometriю проводят другими методами. При этом тепловая информация о внутренней структуре объекта контроля практически полностью теряется. Причина этого – отсутствие универсальных методов обработки термограмм, выполняющих не только стандартные процедуры, но и решающих оптимальным образом обратную задачу теплопроводности, а также – неоптимальность проведения процедуры контроля. Уже давно известно, что проведение активного теплового контроля оптимальным образом может в несколько раз повысить его чувствительность, а информации, содержащейся в тепловом отклике, вполне достаточно, чтобы в большинстве случаев с точностью определить

контролируемые параметры [2]. Цель настоящей работы – формализовать, насколько это возможно, задачу оптимизации теплового контроля, высветить основные проблемы, стоящие на пути создания универсальной методики оптимизации, и наметить пути их решения.

1. Решение прямой задачи АТНК

Прямая задача АТНК формулируется в ряде работ как расчет теплового отклика на заданное тепловое воздействие для бездефектного образца и образца с дефектом. Определяемые в результате температурный перепад на поверхности ΔT и температурный контраст $A = \Delta T / T$ считаются основными критериями дефектности в задаче тепловой дефектоскопии. Оптимизация параметров процедуры теплового контроля проводится в целях максимизации этих критериев [2]. Однако в ряде случаев (например, при наличии ограничения на максимальную температуру нагрева) эти критерии конфликтуют друг с другом. Кроме того, конечной целью контроля является определение параметров дефекта или вывод о его наличии. И для оптимизации результата контроля требуется учитывать не только получаемый перепад, но и наличие шумов, информативность результата контроля, методику обработки измеренного отклика и многое другое. Только при корректном рассмотрении всех этих вопросов в рамках решения прямой задачи и введении новых обобщенных критериев оптимизации можно рассчитывать на построение универсальной методики оптимизации АТНК.

С точки зрения задачи проектирования и оптимизации средств теплового контроля прямой задачей можно считать расчет конечного результата контроля при заданных априорно параметрах установки и режима проведения измерений. А обратной – определение допустимых и оптимальных параметров установки и режима контроля для полного набора возможных дефектов. Структурная схема решения прямой задачи АТНК показана на рисунке.



Нагрев объекта производится источником теплового возбуждения, а измерение теплопередачи – тепловизором или тепловым дефектоскопом. Прямая задача является достаточно разветвленной и включает в себя ряд отдельных задач. В зависимости от цели контроля (тепловая дефектоскопия, дефектометрия или томография) результатами решения прямой задачи могут быть соответственно: вероятности ошибок первого и второго рода при обнаружении заданного дефекта; погрешности в определении параметров дефекта; разрешающая способность томографического метода. При этом выбор критериев оптимизации на основе априорных знаний о структуре и частоте различных

дефектов, возможностей технических средств контроля и т.п. представляет собой непростую задачу.

Решение прямой задачи теплового контроля в целом можно рассматривать как некую обобщенную функцию, аргументами которой являются как привычные для подобного рода задач параметры, такие как теплофизические характеристики объекта контроля и дефекта, динамические и геометрические параметры режима нагрева и измерения, так и параметры размерности задачи (локальный или распределенный дефект, точечный, полосовой или распределенный нагрев и т.п.). Последние принимают дискретные значения и существенно усложняют решение задачи оптимального проектирования.

2. Частные методики оптимизации при проектировании средств АТНК

Прежде чем перейти к рассмотрению возможности построения универсальной методики оптимизации проектирования, рассмотрим ряд частных задач, каждая из которых обеспечивает оптимизацию той или иной части приведенной выше структуры.

Важным элементом комплекса теплового неразрушающего контроля является измерительное устройство. В качестве такового применяются тепловые дефектоскопы или тепловизоры. Тепловые дефектоскопы несканирующие или с одноосевым сканированием используются в том случае, когда объект контроля перемещается в ходе технологического процесса. С помощью тепловизоров производится контроль неподвижных объектов.

Следует отметить, что одним из толчков к развитию ТНК явилась уже достаточно широкая к 70-м годам экспериментальная база. Ее основу составляли инфракрасные системы, которые были достаточно известны и широко применялись в различных областях науки и техники. Развитие тепловизионной техники происходило в направлении универсализации: улучшения эксплуатационных характеристик, повышения чувствительности и улучшения измерительных функций, повышения метрологических характеристик, обработки изображений. Поэтому применение тепловизоров наиболее эффективно для исследования стационарных тепловых процессов. Несколько наиболее удачных моделей тепловизоров были доведены до серийного производства [1 - 5,13].

Анализ работ [2 - 12] показал некоторое противоречие между разработчиками аппаратуры теплового контроля (преимущественно, инфракрасной) и пользователями этой аппаратуры для контроля промышленной продукции. Разработчики собственно приборов весьма неохотно принимают на себя обязательства по обеспечению требуемой вероятности правильного обнаружения дефектов минимального размера, которая задается (или, по крайней мере, должна задаваться) заказчиком. Чаще всего разработчики стремятся ограничить себя стандартными техническими требованиями к инфракрасной аппаратуре: температурной чувствительности, угловому разрешению, быстродействию (основные параметры тепловизоров). Зачастую эти

параметры слабо связаны с характеристиками обнаружения дефектов. Кроме того, большой сложностью при тепловизионном контроле является создание равномерного площадного нагрева.

Наиболее ярко особенности ТНК проявляются при нестационарных тепловых процессах. Это обстоятельство вызвало большое число работ, посвященных оптимизации параметров тепловых дефектоскопов. Тепловые дефектоскопы проектировались для контроля конкретных изделий и поэтому производились в единичных экземплярах или малыми партиями. При проектировании тепловых дефектоскопов оптимизировались параметры, связанные с характеристиками обнаружения дефектов и учитывающие особенности объектов контроля (геометрические, состояние поверхности, условия контроля). В таблице приведены некоторые примеры аппаратурной оптимизации ТНК.

Как видно из таблицы, оптимизация проводилась или по одному критерию, или по группе критериев, сведенных в функционал. Можно сказать, что в настоящее время отсутствует единый подход к проектированию средств теплового контроля, не учитываются все особенности теплового метода и что все существующие средства контроля являются неоптимальными.

Что касается оптимизации режима контроля, то этому вопросу всегда уделяется особое внимание [13]. Дело в том, что после выбора методики проведения контроля, типа нагревателя и регистрирующего устройства, который проводится проектировщиком в значительной степени на основе личного опыта и интуиции, варьируемыми параметрами режима остаются время нагрева и время задержки

Оптимизация параметров тепловых дефектоскопов для ТНК

Критерий оптимизации	Цель оптимизации	Источник
Функционал $M = Q/P \Delta T$	Проектирование оптимальной системы теплового контроля	[5]
Функционал $G = \Delta T \Delta l$	Установлено соотношение между характеристиками дефектоскопа, обеспечивающее max сигнал от дефекта	[7]
Критерий выявляемости $\Delta u/u$	Установлено влияние глубины залегания дефекта и его размеров на критерий	[8]
Критерий $\Delta T/T$	Снижение влияния излучательной помехи за счет укорачивания спектрального диапазона приемника	[9]
Критерий c/λ	Способ повышения отношения c/λ с помощью спектральной фильтрации	[10]
$\Delta u/u$	Установлены оптимальные соотношения между размерами пятна сканирования и частотными свойствами приемника	[11]

перед измерением отклика. И даже в этом вопросе нет однозначности. Составленные с помощью компьютерного эксперимента таблицы оптимальных значений либо зависят от малого числа параметров, либо дают очень грубую сетку. Кроме того, при наличии ограничений на максимальную температуру нагрева или минимальный размер пятна сканирования эти данные требуют уточнения.

Еще одним из объектов для проведения частной оптимизации является нагревающее устройство. При этом задача фактически делится на две части. Во-первых – собственно выбор необходимого нагревателя (точечный, полосовой, распределенный), во-вторых – выбор оптимальных параметров его работы (мощность, время нагрева, геометрические размеры “пятна нагрева”, однородность потока тепла и т.п.). Как правило, для каждого конкретного изделия эта оптимизация проводится заново и никаких общих методик (за исключением набора качественных рекомендаций) нет.

3. Математические подходы к созданию универсальной методики оптимизации проектирования средств АТНК

Проведенный анализ дает возможность сделать вывод о том, что набор существующих частных методик оптимизации не позволяет рассчитывать на решение сформулированной выше задачи. Кроме того, отсутствует механизм согласования их результатов, не для всех этапов решения прямой задачи теплового контроля эти методики существуют. При их разработке используется весьма ограниченный набор теплофизических моделей. Комплексный подход к преодолению этих недостатков требует в первую очередь создания универсальной математической модели, в рамках которой можно будет описать все этапы контроля и провести общую оптимизацию.

Такой моделью может служить аппарат тепловых передаточных функций (ТПФ). Ранее он был разработан в первую очередь для решения задачи тепловой томографии слоистых изделий с распределенными дефектами. Вектор переменных, преобразуемый с помощью тепловой передаточной функции, представляет собой спектральные комплексные составляющие температурного поля и теплового потока на границе слоя. Комплексная матрица преобразования позволяет связать соответствующие векторы в различных точках объекта контроля. Для решения задачи оптимизации необходимо обобщить метод ТПФ следующим образом:

– перейти от вектора тепловых к вектору информационных параметров на основе применения алгоритмической теории информации (при этом количество информационных переменных, характеризующих тепловой отклик, определяется как минимальное количество макропараметров, введение которых позволяет максимально сократить сложность описания полученного сигнала);

– построить передаточную информационную матрицу объекта контроля, нагревателя, регистрирующего устройства, алгоритма обработки измеренного теплового отклика;

– модифицировать правила сложения и перемножения информационных матриц при параллельном или последовательном соединении каналов преобразования информации (включая как реальные теплофизические процессы, так и математические алгоритмы преобразования);

– в рамках этого математического аппарата сформулировать обобщенный информационный критерий оптимальности теплового контроля.

При этом и входные параметры (подлежащие оптимизации), и выходные (результаты теплового контроля) входят как непрерывные или дискретные переменные в коэффициенты информационной передаточной матрицы.

На следующем этапе решения задачи оптимизации можно воспользоваться методом зондирования пространства параметров [14]. Он позволяет еще до проведения собственно оптимизации учесть все ограничения и требования к результатам контроля. Отметим, что применение аппарата ТПФ позволяет большую часть выкладок на этом этапе провести аналитически.

После формирования пространства параметров на следующем этапе может быть применен метод декомпозиции [15]. Его эффективность определяется тем, насколько удастся упростить параметрическую зависимость коэффициентов информационной передаточной матрицы, т.е. представить ее в виде схемы последовательно и параллельно соединенных матриц отдельных этапов теплового контроля. При этом количество переменных параметров в каждой из них оказывается значительно меньше, что позволяет решить оптимизационную задачу одним из стандартных численных методов. На отдельных этапах оптимизации удастся также использовать решенные ранее частные задачи оптимизации.

Заключение

В настоящей статье рассмотрены проблемы, возникающие при проектировании средств и разработке режимов проведения теплового контроля. Показано, что для реализации возможностей этого метода необходимо в первую очередь создание нового, универсального подхода к рассмотрению задачи оптимизации. Это предложено сделать на основе информационной модели теплофизических процессов и измерительных процедур, сопутствующих контролю. Разработанный ранее метод тепловых передаточных функций может быть модифицирован таким образом, что позволит в едином ключе описывать как процессы распространения тепловых полей в реальных объектах, так и процедуры их математической обработки. Благодаря этому может быть также введен обобщенный информационный критерий оптимизации. В целом можно рассчитывать, что при решении задачи для конкретного объекта контроля большая часть выкладок может быть проведена аналитически. Это, в свою

очередь, позволит выявить качественные закономерности, присущие теплового контролю данного типа изделий. В одной из следующих публикаций планируется описать реализацию предложенной методики оптимизации на примере контроля стеклопластиков.

Литература: 1. *Рекламный проспект* фирмы INFRAMETRICS США, 1999г. 2. *Вавилов В.П.* Тепловые методы неразрушающего контроля. Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 240с. 3. *Стороженко В.А., Вавилов В.П., Волчек А.Д.* Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. Киев: Техника, 1988. 128с. 4. *Вавилов В.П.* Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. М.: Радио и связь, 1984. 152с. 5. *Синеглазов В.М., Протасов А.Г., Кеткович А.А.* Активная тепловая интроскопия. Киев: Техника, 1993. 168с. 6. *Вавилов В.П., Танасейчук С.Ю., Упадышев А.Б., Шабанова О.С., Ширяев В.В.* Комплексный подход к проектированию систем теплового контроля паяных соединений // Дефектоскопия. 1978. №10. С.63-67. 7. *Брикман М.С., Виноградова Л.Н., Клейнберг А.Я, Фастрицкий В.С.* Статистический параметрический синтез средств неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 1985. №8. С. 72-78. 8. *Стороженко В.А.* Оптимизация выбора параметров радиометра для обнаружения пороговых дефектов // Дефектоскопия, 1985, №6. С. 72-74. 9. *Стороженко В.А., Денисов С.С., Иванюшина З.В.* О влиянии параметров дефектов на чувствительность и производительность одностороннего теплового контроля // Дефектоскопия. 1978. №1. С.101-103. 10. *Стороженко В.А.* Оптимизация спектрального диапазона устройств теплового неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 1988. №5. С.69-73. 11. *Вавилов В.П.* Повышение отношения сигнал/помеха в тепловых дефектоскопах с помощью спектральной фильтрации // Дефектоскопия. 1985. №8. С.65-71. 12. *Вавилов В.П., Стороженко В.А., Иванюшина З.В.* Влияние размеров пятна сканирования и частотных свойств фотоприемника на чувствительность АТНК // Дефектоскопия. 1984. № 4. С.54-57. 13. *Вавилов В.П.* Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. М.: Радио и связь, 1984. 152с. 14. *Соболь И.М., Статников Р.Б.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110с. 15. *Муссеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 488с.

Поступила в редколлегия 27.12.2000

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Себко В.П.

Мешков Сергей Николаевич, ст. преподаватель кафедры физики ХТУРЭ. Научные интересы: тепловидение, термография, аппаратура теплового контроля, метрология инфракрасной пирометрии. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Шекспира, 14, кв. 26., тел.(0572) 32-30-25.

Мельник Сергей Иванович, доцент кафедры физики, докторант ХТУРЭ. Научные интересы: задачи оптимизации процедуры гипертермии при лечении онкозаболеваний, применение алгоритмической теории сложности к вопросам обоснования статистической теории. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Корчагинцев, 5, кв. 357, тел. (0572) 11-37-44.