

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Надежная и безопасная работа современных сложных технических объектов, например энергетических ядерных реакторов, во многом определяется точностью и оперативностью информации о значениях важнейших пространственно распределенных параметров — температуры, энерговыделения и др. На основе этой информации в штатных системах контроля осуществляется выработка необходимых управляющих воздействий. Соответственно, чем выше качество исходной информации об объекте, тем эффективнее и безопаснее его эксплуатация.

При проведении измерений пространственно распределенных физических величин интервалы Δx_i расположения датчиков обычно выбирают на основе теоремы Котельникова [1] по верхним граничным частотам $\omega_{i_{\max}}$ в спектре измеряемого многомерного сигнала. При этом для исключения эффекта наложения частот и потери части измерительной информации интервалы установки датчиков вдоль каждой координатной оси должны удовлетворять следующему условию [1]:

$$\Delta x_i = \frac{\pi}{\omega_{i_{\max}}}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Однако для сложных технических объектов это правило нередко нарушается вследствие различных физических, конструкционных и экономических ограничений. Например, для контроля пространственно неоднородных полей энерговыделения ядерных реакторов типа РБМК не может быть использовано необходимое число детекторов нейтронного или γ -излучения, поскольку их установка связана с введением в реактор значительного количества поглощающих материалов, заметно ухудшающих физические характеристики активной зоны [2]. В результате учета подобных ограничений число используемых датчиков оказывается меньше числа, определенного на основе соотношения (1), а объем снимаемой с этих датчиков измерительной информации — недостаточным для обеспечения требуемой точности восстановления физических полей.

Для получения недостающей информации в последнее время все шире используются результаты моделирования анализируемых пространственных процессов на ЭВМ [3, 4], причем в некоторых случаях математическая модель является неотъемлемой частью штатных систем контроля [2, 4]. На это указывает, в частности, и тот факт, что современные методы восстановления физических полей ориентированы именно на совместный учет измерительной и расчетной информации [3–5]. Такой подход оказался перспективным с точки зрения повышения точности контроля, которая в некоторых алгоритмах, например вариационном [3] и цифровом [5], близка к теоретически возможному минимуму.

Представляется, что аналогичное совместное использование разнородной информации может оказаться полезным и для рационального построения штатных измерительных систем. При этом обоснование необходимого числа устанавливаемых на объекте датчиков и выбор их наилучшего взаимного расположения могут быть выполнены уже не путем удовлетворения разнообразных ограничений, а путем перехода к более объективному и экономичному информационному критерию полноты измерительной сети.

Для обоснования этого критерия используем частотное представление информации [1], в соответствии с которым недостаточно густая сетка датчиков не позволяет восстанавливать верхние пространственные частоты в спектре анализируемого физического поля. В результате единственным источником информации о таких частотных составляющих, названных в работе [5] областью микроструктуры, может быть только математическая модель. Реальное существование области микроструктуры приводит к следующим важным вопросам: можно ли, сохраняя требуемую



точность восстановления физических полей по алгоритмам типа приведенных в работах [3, 5], увеличить область микроструктуры, сокращая число установленных датчиков, и где тот разумный предел, до которого такое увеличение еще будет иметь смысл? Для обоснования этого предела используем отмечавшуюся многими исследователями частотную неоднородность погрешности моделирования физических полей на ЭВМ [4, 6, 7]. Действительно, технологические допуски при изготовлении элементов конструкции и эксплуатации аппаратов, например ядерных реакторов, приводят к тому, что их математические модели характеризуются случайным разбросом параметров для каждого узла сетки. Наличие таких случайных погрешностей в уравнениях математической физики приводит к появлению ошибок расчета физических полей, причем погрешность расчета имеет ярко выраженный низкочастотный характер с резким убыванием при переходе к более высоким частотам [4, 6, 7]. Например, в работе [7] показано, что при расчете поля нейтронов ядерного реактора по диффузионному уравнению со случайным разбросом макроконстант в спектре погрешности расчета с вероятностью 73 % возникает первая гармоника, а вероятность возникновения третьей гармоники составляет всего около 2 %. В связи с этим ранее авторами настоящей статьи был разработан цифровой алгоритм восстановления физических полей [5], в котором от каждого источника информации — результатов моделирования и сигналов датчиков — предлагалось взять ту часть пространственного спектра, которая обладает наименьшей погрешностью, а необходимое для этого частотное разделение информации выполнить с использованием цифровых фильтров. В качестве частоты раздела, т. е. допустимого уровня расширения области микроструктуры, в настоящей работе предлагается использовать те граничные частоты $\omega_{i\text{нозрmax}}$, $i=1,2,3$, для которых выполняется следующее соотношение:

$$\sigma_{\text{кл}} = \sigma_{\text{мм}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{кл}}$ — среднеквадратическая погрешность калибровки установленных на объекте датчиков контроля рассматриваемого физического поля; $\sigma_{\text{мм}}$ — среднеквадратическая погрешность расчета физического поля по математической модели.

В результате учета выражения (2) и перехода к более редкой сетке датчиков, интервалы установки которых выбраны из условия

$$\Delta x_i = \frac{\pi}{\omega_{i\text{нозрmax}}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

алгоритмы типа приведенных в работах [3, 5] обеспечивают практически такую же точность восстановления физических полей, что и при использовании более плотной сетки датчиков штатных систем контроля. Появляющаяся при этом некоторая избыточность количества установленных на объекте датчиков может быть использована двояко.

С одной стороны, можно сформировать и динамически менять группу поверочных датчиков. При этом представляется возможным не использовать их показания в алгоритме восстановления физического поля, а применять их только для контроля качества работы самого алгоритма.

С другой стороны, для данной группы датчиков существует возможность оперативного проведения проверок и градуировок — например, по алгоритму типа [8].

В любом случае, предложенный в настоящей работе критерий информационной достаточности сетки датчиков приводит к появлению новых качественных возможностей в работе измерительных систем, что, безусловно, положительно скажется на повышении надежности и безопасности работы сложных технических объектов.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Каппелини В., Константиноидис А., Эмилиани П. Цифровые фильтры и их применение. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Доллежалъ Н. А., Емельянов И. Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М.: Атомиздат, 1980.
3. Веселов В. В., Гонтов Д. П., Пустыльников Л. М. Вариационный подход к задачам интерполяции физических полей. М.: Наука, 1983.
4. Филипчук Е. В., Потапенко П. Т., Постников В. В. Управление нейтронным полем ядерного реактора. М.: Энергоиздат, 1981.
5. Иваненко В. Г., Саманчук В. Н. Восстановление полей энерговыделения в РБМК методами цифровой фильтрации // Атомная энергия. 1993. Т. 74. Вып. 4.
6. Карпов В. А., Назарян В. Г., Постников В. В. Исследование случайной составляющей распределения тепловыделения в ядерном реакторе // Атомная энергия. 1976. Т. 40. Вып. 6.
7. Горюнов В. К. Перекосы поля нейтронов в реакторах при случайно распределенных возмущениях макросечений // Атомная энергия. 1980. Т. 49. Вып. 5.
8. Саманчук В. Н. Применение цифровых фильтров для восстановления утраченной измерительной информации // Цифровая обработка информации в ядерно-энергетических системах. М.: Энергоатомиздат, 1989.

