

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

Східноукраїнського Державного Університету

№ 1 (11) 1998

ВИДАВНИЦТВО СУДУ

Луганськ 1998

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТОКОВИХРЕВОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

В.Я. Гальченко

В статье содержатся сведения об эффективном использовании метода имитационного моделирования процессов токовихревого контроля объектов на этапе проектирования технических средств неразрушающего электромагнитного контроля. Основное внимание уделяется разработке приемов дискретизации поверхности исследуемого объекта как одному из влиятельных источников снижения погрешности вычислений.

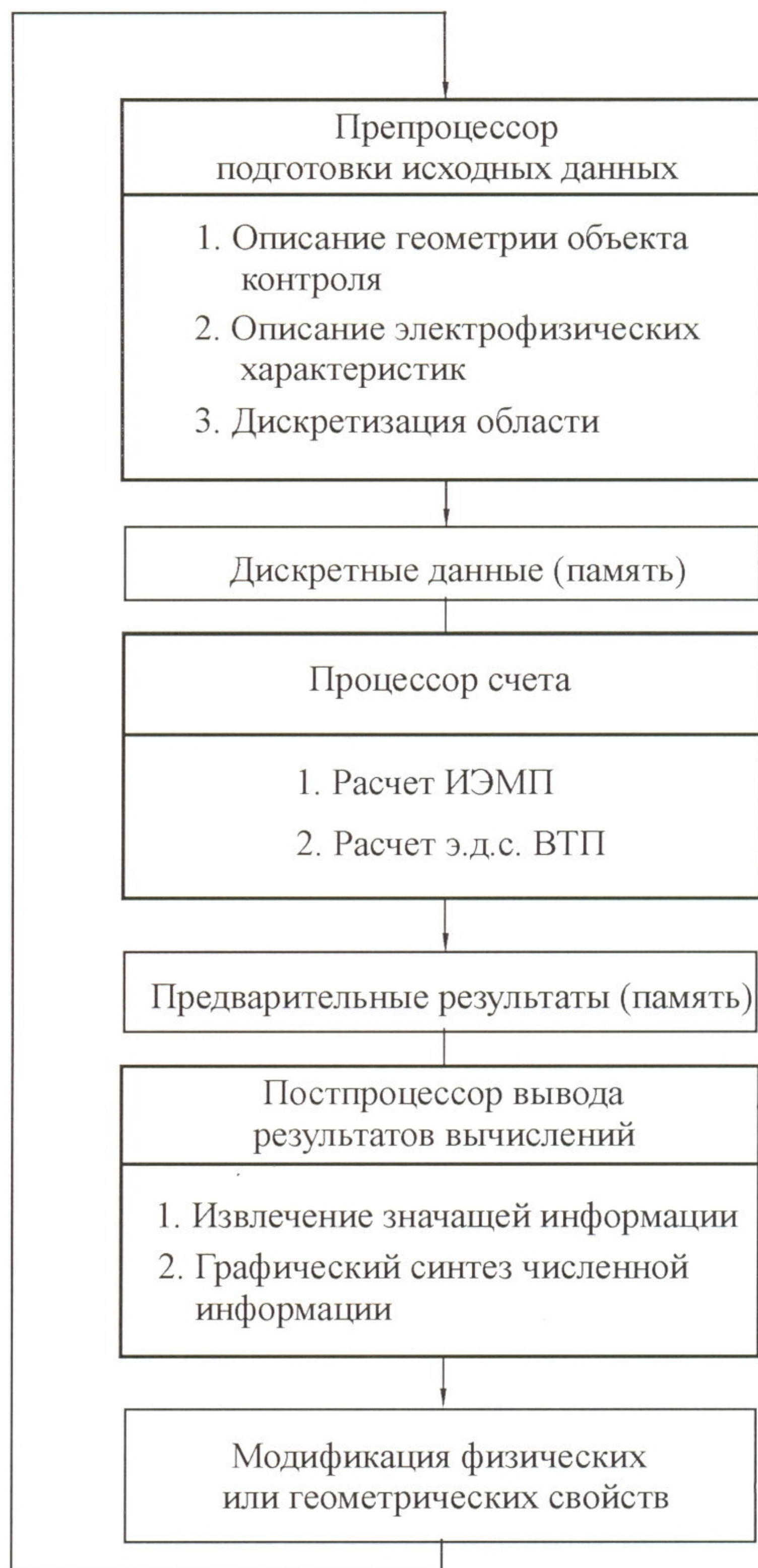
В теории электромагнитной дефектоскопии общим стремлением ряда исследователей является желание описать процессы формирования выходного сигнала вихретоковых преобразователей (ВТП) на базе единого методологического подхода, позволяющего анализировать широкий круг типовых случаев контроля с использованием одной или небольшого числа математических моделей [1-4].

Практическая реализация такого подхода с применением аналитических методов расчета сталкивается со значительными трудностями, обусловленными существенным многообразием расчетных моделей с одной стороны и вынужденными упрощениями геометрических свойств таких моделей с другой стороны. Это приводит к тому, что практически для каждого нового объекта контроля приходится формулировать задачу индивидуально, а затем искать ее решение в аналитической форме, ориентируясь на конкретную расчетную модель.

Указанные трудности могут быть преодолены в результате использования численных методов анализа [5,6]. Задачи электромагнитной дефектоскопии характеризуются с математической точки зрения следующими особенностями: необходимостью решения в открытых и закрытых областях (наружные и внутренние проходные ВТП, накладные ВТП); односвязностью и многосвязностью анализируемых областей (поверхностные и подповерхностные дефекты, объекты контроля сложной конфигурации, ВТП с концентраторами поля, экранами и масками); двух- и трехмерной зависимостью от пространственных координат (дефекты бесконечной и конечной длины, объекты ограниченных и неограниченных размеров). Поэтому эффективность решения таких задач на базе единого методологического подхода во многом определяется правильным выбором численного метода анализа.

Следует заметить, что с учетом рассмотренных особенностей задач электромагнитной дефектоскопии целесообразным безусловно является применение метода граничных интегральных уравнений (ГИУ) [7,8].

Возможности и преимущества использования данного метода применительно к задачам токовихревого контроля достаточно полно рассмотрены в работе [9]. Меньшая размерность решаемых задач по сравнению с МКЭ и МКР, возможность эффективного использования в открытых и закрытых, односвязных и многосвязных областях, индифферентность к форме поверхности объекта с дефектом и их учет в полной мере при моделировании - все эти достоинства относятся к применению метода ГИУ для описания процессов обнаружения дефектов. Теоретические и практические аспекты построения информационных моделей процессов вихретокового контроля объектов в полной мере изложены в [9], где наряду с математическими моделями большое внимание уделяется построению алгоритмов и разработке программных модулей. Общая структура программного комплекса представлена на рисунке 1.



ИЭМП - информационное электромагнитное поле

Рисунок 1. – Структура программного комплекса.

При численном решении электродинамических задач неизбежны различные допущения, упрощения, аппроксимации и погрешности. Анализ погрешностей метода и оценка точности численного решения ряда тестовых задач представлены в работе [9], где также рассматриваются способы управления погрешностями вычислений на различных этапах компьютерного моделирования процессов токовихревого контроля.

Среди прочих наименее изученной в настоящее время при использовании метода ГИУ остается проблема контроля погрешности дискретизации. Погрешности дискретизации вносятся на этапе перехода от теоретической математической модели к расчетной и обуславливаются аппроксимацией, введенных согласно методу ГИУ, фиктивных поверхностных источников. На величину погрешности дискретизации существенное влияние оказывают следующие два фактора. Первым фактором является способ и порядок аппроксимации искомым источникам ИЭМП. Предлагаемый в [9] программный комплекс использует простейшую аппроксимацию источников - кусочно-постоянную. Повышение порядка аппроксимации незначительно влияет на трудоемкость алгоритма, но существенно усложняет его программную реализацию и увеличивает объем вычислительных работ. Поэтому ограничиваясь нулевым порядком аппроксимации источников ИЭМП, основное внимание сосредоточим на факторе дискретизации исходной системы ГИУ [9] конечномерным расчетным аналогом. При этом интеграл по поверхности исследуемого объекта заменяется конечной суммой в соответствии с выбранной квадратурной формулой. Для реализации данного перехода требуется аппроксимировать поверхность объекта контроля элементами поверхности, т.е. микроэлементами. Увеличение числа поверхностных микроэлементов должно повышать точность расчетов, но при этом резко возрастает объем вычислений, так как формируемая в результате перехода от ГИУ СЛАУ имеет плотно заполненную матрицу.

К сожалению, даже для объекта контроля с достаточно простой геометрической формой совершенно затруднительно априорно определить количество и размеры поверхностных микроэлементов. Очевидно, что равномерное расположение на поверхности объекта контроля одинаковых по форме микроэлементов с размерами соизмеримыми с поверхностями, образующими полость дефекта, является идеальным для численных расчетов, но практически всегда оказывается не реальным из-за требуемых технических ресурсов вычислительной техники и существенного накопления иных вычислительных погрешностей. В то же время заранее можно утверждать, что увеличение степени дискретизации вблизи линий резкого излома поверхности объекта контроля в значительной мере сказывается на точности полученного решения. Обычно на практике эта проблема решается путем "пробного" выбора достаточно большого количества микроэлементов, ограничиваемого только лишь техническими особенностями используемого компьютера [10,11]. Оценка погрешности дискретизации при этом производится косвенным образом - проверкой сходимости численного решения при увеличении количества микроэлементов (порядка СЛАУ). Критерием удовлетворительности результата в этом случае является его относительная неизменность при повторных вычислениях с постоянно увеличивающимся порядком матричного уравнения. При этом неявно подразумевается, что при неограниченном продолжении процесса результат совпадет с точным решением задачи. Следовательно, постоянство численного результата рассматривается как его близость к точному решению. Применение такой схемы расчета оставляет открытым вопрос о размерах поверхностных микроэлементов и их месторасположении на поверхности объекта относительно полости дефекта.

Известны работы по количественной оценке погрешности для случаев, когда исследуемый объект имеет совершенно определенную геометрическую форму достаточно простой конфигурации, но при этом не учитывается наличие дефекта на объекте. Для тел произвольной геометрии установление реальной оценки для ошибки счета как функции размеров и особенностей формы объекта на современном этапе вряд ли возможно, хотя необходимость в этом очевидна.

В данном исследовании обобщен опыт снижения погрешности дискретизации при моделировании процессов токовихревого контроля объектов с применением накладных ВТП. Анализ задач возбуждения электропроводящих объектов с дефектами электромагнитными полями сопряжен с необходимостью учета существенного различия в геометрических размерах самого объекта контроля и полости дефекта, что и определяет специфику их решения.

На модельных задачах исследуем влияние различных факторов на результаты численных расчетов. Поскольку процесс контроля накладным ВТП характеризуется существенной локальностью, то при построении расчетной модели возможно некоторое

упрощение задачи. При этом для проведения численных исследований объект контроля может быть заменен собственно дефектом, вычлененным из объекта с прилегающей к нему частью поверхности реального тела. Размеры прилегающего участка поверхности выбираются таким образом, чтобы они превышали в несколько раз размеры дефекта, что гарантирует учет специфики формы реального объекта. Так, например, для многих случаев контроля может использоваться расчетная модель, изображенная на рисунке 2.



Рисунок 2. – Расчетная модель объекта с дефектом конечных размеров при контроле накладным ВТП.

Исследования будем проводить для объекта, который характеризуется следующими параметрами: геометрические размеры прилегающей поверхности 80x80 мм; геометрические размеры полости дефекта $l_n \times b_n \times t_n = 10 \times 0,5 \times 1$ мм; относительная магнитная проницаемость материала $\mu_r = 2$; удельная проводимость $\gamma = 2,5$ МСм/м.

В качестве моделей источников зондирующего поля (ИЗП) будем при расчетах использовать: а) источник однородного ИЭМП - ИЗП1, который характеризуется тремя компонентами поля неизменными в рассматриваемых точках пространства; б) источник неоднородного поля - ИЗП2, представленный катушкой возбуждения ВТП с прямоугольным поперечным сечением. Возможность сопоставления полученных результатов вычислений обеспечивалась использованием для модели ИЗП1 компонент поля, определенных для ИЗП2 при следующих исходных данных: размеры поперечного сечения катушки ИЗП2 $a \times c = 2 \times 2$ мм; внутренний радиус катушки $R_b = 6$ мм; высота размещения нижней кромки катушки над поверхностью объекта $h_1 = 4$ мм; ток в катушке $\dot{I} = (0,05 + j 0,05) В$; частота тока возбуждения $f = 10$ кГц; число витков в катушке $w_1 = 50$.

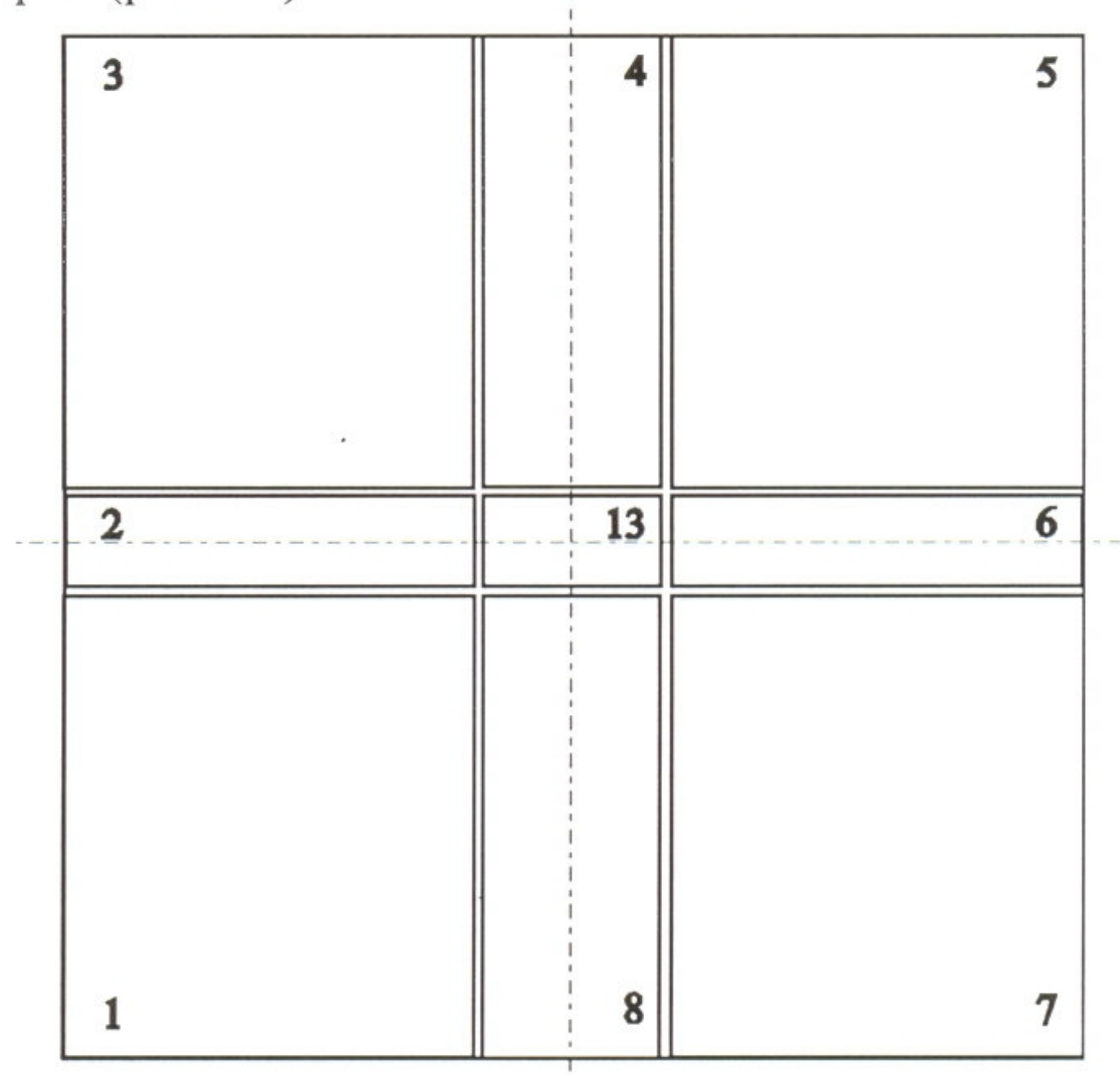
Измерительная катушка ВТП при моделировании процессов контроля характеризовалась следующими параметрами: радиус катушки $R_3 = 5$ мм; число витков $w_2 = 50$; количество разбиений вдоль радиуса $n_R = 5$; количество секторов разбиений $n_s = 7$; высота размещения над поверхностью объекта $h_2 = 1$ мм.

При моделировании измерительная катушка ВТП, расположенная коаксиально по отношению к катушке возбуждения, перемещалась вдоль оси Ох из точки с координатами $(-15 \cdot 10^{-3}; 0; 1 \cdot 10^{-3})$ до точки с координатами $(15 \cdot 10^{-3}; 0; 1 \cdot 10^{-3})$ перпендикулярно по отношению к направлению дефекта конечных размеров. В 30-ти промежуточных контрольных точках фиксировались модуль и фаза э.д.с., наведенной в измерительной катушке ВТП в результате имитации процесса контроля объекта, а также распределение поля рассеяния дефекта, рассчитанные в соответствии с рекомендациями [9].

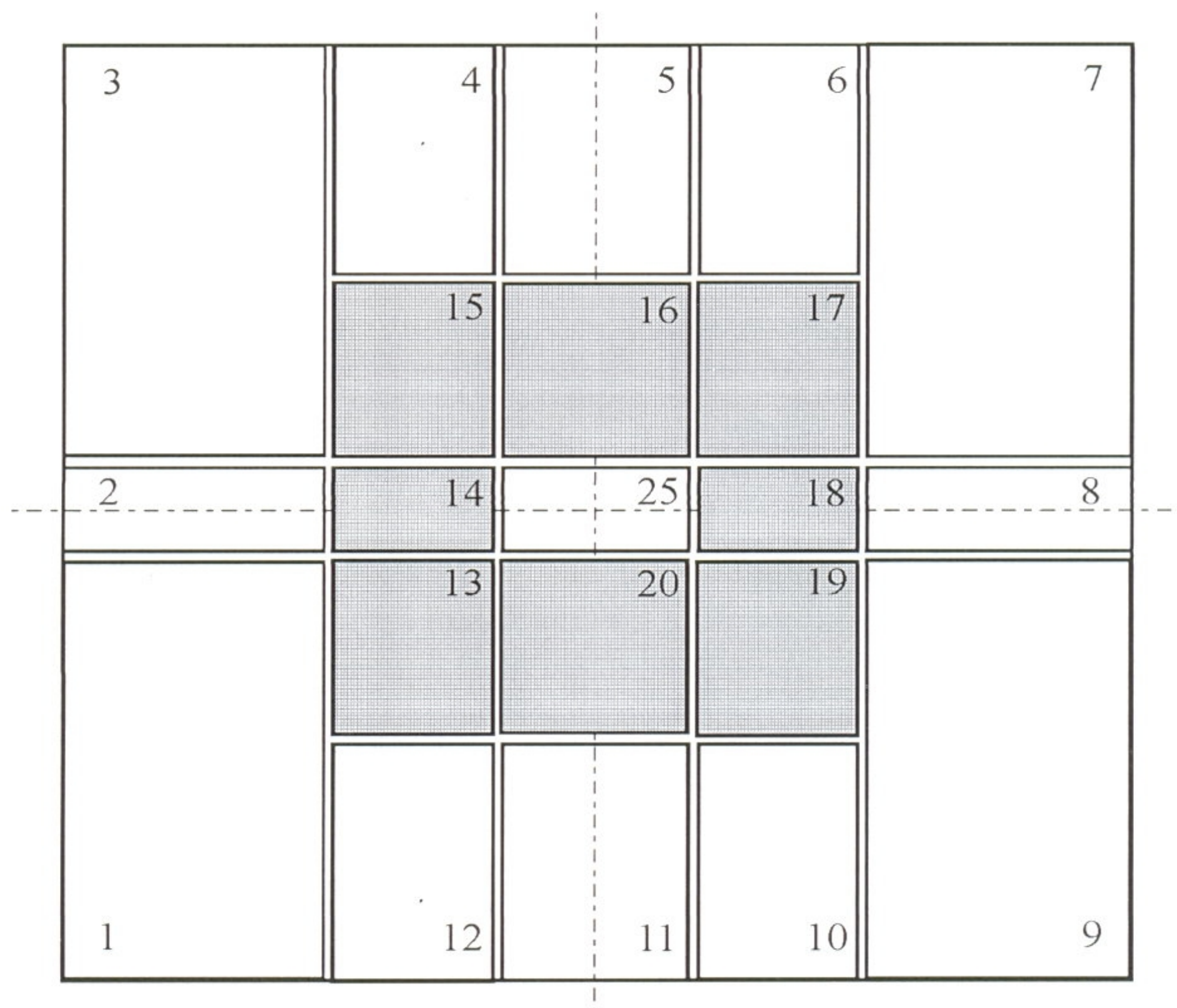
При вычислениях с применением модели ИЗП2 в алгоритм формирования СЛАУ по

сравнению с [9] внесены незначительные изменения, которые заключались в пересчете правых частей СЛАУ и ее решении на каждом шаге ИЗП, что приближает к реальным условия проведения контроля.

На первом этапе объект контроля, представленный расчетной моделью РМ1 (см. рис. 2), аппроксимировался 13-ю поверхностными микроэлементами со значительной разницей в геометрических размерах (рис. 3а).



а) расчетная модель РМ1 с минимальной степенью дискретизации



б) расчетная модель РМ2 с первым эшелоном опоясывающих площадок

Рисунок 3. – Расчетные модели объекта контроля.