УДК 004.94

Минимизация количества итераций калибровки однородности поля для испытаний на помехоустойчивость радиоэлектронных средств в безэховой камере

Семенюк В. А., Газизов Т. Р.

Постановка задачи: *калибровка однородности электрического поля в безэховой камере является важной задачей для обеспечения достоверности испытаний на электромагнитную совместимость. Существующие итеративные методы калибровки часто требуют значительного числа итераций, что увеличивает временные затраты и повышает износ измерительного оборудования. Применение методов поиска корней для минимизации числа итераций позволит ускорить процесс калибровки, однако их эффективность и робастность в условиях, приближенных к реальным измерениям, остаются недостаточно исследованными.* ***Цель работы:*** *провести анализ методов поиска корней для минимизации числа итераций при калибровке однородности поля с оценкой их робастности в условиях неопределённостей измерений с помощью метода Монте-Карло.* ***Используемые методы****: для минимизации числа итераций в процессе калибровки использованы гибридные и бисекционные методы поиска корней. Эффективность и робастность методов оцениваются методом Монте-Карло путём искусственного внесения неопределённостей измерений в вычислительный эксперимент. Критерием останова методов поиска корней является достижение заданного уровня напряжённости поля с выбранным допуском.* ***Новизна:*** *предложено и апробировано применение методов поиска корней для минимизации числа итераций калибровки однородности поля с учётом неопределённости измерений, что позволяет уменьшить время калибровки однородности поля в безэховой камере.* ***Результат:*** *выполнен вычислительный эксперимент по достижению требуемой напряжённости электрического поля с точностью 0,1 В/м. Без учёта неопределённостей методы Dekker, Brent и Bisection обеспечивают сходимость в среднем за 6,75, 9,25 и 7,25 итерации соответственно; высокая погрешность методов Newton и Secant объясняется их чувствительностью к выбору начального приближения. С учётом неопределённости измерений метод Bisection показал минимальное число итераций (4,75), а методы Toms748 и Brent продемонстрировали наилучшую точность и устойчивость к шумам, минимально влияя на неопределённость измерений.* ***Практическая значимость:*** *установлено преимущество гибридных и бисекционных методов для минимизации числа итераций процесса калибровки однородности поля. Рекомендованные методы позволяют сократить время калибровки и снизить износ испытательного оборудования без потери точности. Предложенный подход может применяться при разработке и совершенствовании процедур калибровки однородности поля для испытаний на помехоустойчивость радиоэлектронных средств в безэховой камере.*

Ключевые слова: *электромагнитная совместимость, однородность поля, калибровка, неопределенность измерений, методы поиска решения, метод Монте-Карло.*

Актуальность

В современном мире спрос на высокотехнологичную продукцию, поддерживающую различные методы связи, преобразователи напряжения и т.д. по-

Библиографическая ссылка на статью:
Семенюк В. А., Газизов Т. Р. Минимизация количества итераций калибровки однородности поля для испытаний на помехоустойчивость радиоэлектронных средств в безэховой камере // Системы управления, связи и безопасности. 2026. № 4. С. 105-121. DOI: 10.24412/2410-9916-2026-4-105-121

Reference for citation:
Semenuik V. A., Gazizov T. R. Minimization of the number of iterations in field uniformity calibration for radioimmunity testing of electronics devices in fully anechoic chamber. *Systems of Control, Communication and Security*, 2026, no. 4, pp. 105-121 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2026-4-105-121

стоянно возрастает, что неизбежно ведёт к росту объёма проводимых испытаний на электромагнитную совместимость (ЭМС). Данные испытания необходимы для надежной работы и сертификации оборудования в соответствии с международными и национальными стандартами. Испытания на помехоустойчивость являются одними из основных в области ЭМС и проводятся, применяя различные типы установок, включая открытые испытательные площадки, полностью безэховые камеры (БЭК) [1] согласно IEC 61000-4-3, полосковые линии [2] согласно IEC 61967-8, TEM/GTEM-камеры [3] согласно IEC 61000-4-20 и реверберационные камеры (РК) [4] согласно IEC 61000-4-21. Ключевым этапом подготовки к испытаниям на помехоустойчивость является калибровка измерительной установки на однородность поля, позволяющая повысить достоверность и повторяемость результатов. В ходе калибровки, при испытаниях в БЭК и РК, решается задача установления соответствия между выходной мощностью, подводимой к излучающей антенне измерительной системы, и измеренной напряжённостью электрического поля в зоне испытуемого объекта (ИО). Существующие исследования фокусируются на оценке корректности критериев однородности поля различных измерительных установок [5, 6], а также на анализе неопределенностей результатов измерений при испытаниях на ЭМС [7, 8].

Для снижения неопределённости результатов измерений и повышения их точности, разрабатываются различные программные средства, позволяющие проводить автоматизированные испытания на ЭМС. Основные временные затраты при автоматизированных калибровке и испытаниях связаны с взаимодействием измерительного оборудования с программным обеспечением (ПО), поскольку для достижения требуемой точности необходимо выполнить множество измерений при различных положениях антенны и датчика поля. Точность калибровки и измерения при испытаниях в значительной степени зависит от стабильности характеристик измерительной установки [9, 10].

Существующие стандарты не регламентируют конкретные методы поиска оптимальной выходной мощности, подводимой к излучающей антенне при калибровке. Для автоматизации в ПО применяют разные методы поиска оптимальной мощности, что увеличивает временные затраты на калибровку и измерения при испытаниях. Кроме того, на практике используют много разных измерительных систем, а их характеристики могут отличаться как от заявленных в технической документации, так и между собой. В результате, сравнительный анализ методов поиска значений с минимальным числом итераций взаимодействия измерительного оборудования с ПО является актуальной задачей, поскольку каждый запрос в автоматизированной системе является затратной операцией по времени.

Измерительная установка и ее калибровка

Согласно большинству стандартов на ЭМС, калибровка однородности поля проводится по объему испытательной зоны или поверхности перед излучающей антенной. Условия из стандарта (IEC 61000-4-3) определяют зону од-

нородности поля в БЭК как гипотетическую вертикальную плоскость, для которой допустимо, что поле на заданной частоте считается однородным, если его напряженность находится в пределах от 0 до 6 дБ от номинального значения как минимум для 75% всех точек из 16 измеренных при вертикальной и горизонтальной поляризациях, например, если значения находятся в пределах допуска для 12 из 16 точек в плоскости площадью 1,5 м^2. Регламентированные стандартом (IEC 61000-4-3) испытательные уровни и соответствующая им напряжённость поля представлены в таблице 1, специальный уровень (x) испытаний является тестовым уровнем, который может быть задан в программе испытаний для ИО.

Таблица 1 – Испытательные уровни (IEC 61000-4-3)

Уровень	Напряженность электрического поля (В/м)
1	1
2	3
3	10
4	30
x	x

При калибровке применяют различные методы для создания в зоне ИО требуемой напряженности электрического поля в заданном диапазоне частот. Одним из них является метод постоянной напряженности электрического поля, который заключается в нахождении такой мощности для каждой пространственной точки во всем диапазоне частот, при которой на заданном расстоянии наблюдается требуемая напряженность электрического поля. Второй метод постоянной мощности заключается в том, что поиск мощности выполняется только для первой пространственной точки во всем диапазоне частот, затем найденное значение мощности используется для всех оставшихся пространственных точек.

Следовательно, при калибровке однородности поля, необходимо найти значения подводимой мощности ($P_{\text{прям.}}$) к излучающей антенне, которая позволит сформировать требуемую напряженность электрического поля ($E_{\text{треб.}}$) в заданной пространственной точке, как

$$E(P_{\text{прям.}}) = E_{\text{треб.}}. \quad (1)$$

Согласно IEC 61000-4-3, в состав оборудования для калибровки однородности поля (рис. 1) входят следующие компоненты.

1. БЭК, размеры которой достаточны для создания однородного поля в области, соответствующей габаритам ИО.
2. Генератор сигналов, перекрывающий требуемый диапазон частот и формирующий амплитудно-модулированный сигнал с частотой модуляции $f_{\text{ам}}$= 1 кГц и коэффициентом модуляции M = 0,8.
3. Усилитель мощности для усиления немодулированного и (или) модулированного сигналов. Уровень высших гармоник на его выходе должен быть не менее чем на 6 дБ ниже уровня основной частоты.

4. Антенны с линейной поляризацией (биконические, логопериодические, рупорные), работающие в заданном диапазоне частот.
5. Датчик поля, измеряющий амплитуду напряжённости поля в заданной точке испытательной зоны.
6. Вспомогательное оборудование, например направленный ответвитель и датчики мощности прямой и отражённой волн.



Рис. 1. Измерительное оборудование для калибровки однородности поля и испытаний на ЭМС в БЭК

Необходимая мощность для создания требуемой амплитуды напряженности электрического поля зависит от измерительного оборудования, а связь между коэффициентом усиления антенны и мощностью, подводимой к антенне, обусловлена эффективной излучаемой мощностью (ЭИМ). Среднеквадратичное значение напряжённости электрического поля (E, В/м) для дальней зоны вычисляется как (IEC 61000-4-3)

$$E = k\frac{\sqrt{P_{\text{ЭИМ}}}}{d}, \qquad (2)$$

где k – коэффициент от 3 до 7, зависящий от используемой антенны, P –ЭИМ, Вт, d – расстояние от антенны до точки измерения, м.

Часто при измерениях используют выражение на основе уравнения передачи Фрииса [11] в котором коэффициент k в (2) заменяется на коэффициент $\sqrt{30}$, описывающий распространение электромагнитного поля в дальней зоне:

$$E = \frac{\sqrt{30P_{\text{ЭИМ}}}}{d}. \qquad (3)$$

Достоверность уравнения Фрииса [10] зависит от того, находится ли точка наблюдения в дальней зоне, а возможность достижения таких условий при реальных измерениях в БЭК часто ограничена [12]. Несмотря на это, (3) широко применяется при испытаниях на помехоустойчивость радиоэлектронных средств.

Точность и повторяемость результатов измерений при испытаниях на ЭМС в значительной степени зависят от правильной оценки неопределённости измерений [6]. В испытаниях на устойчивость к излучаемым помехам согласно IEC 61000-4-3 особенно важна неопределённость напряжённости электрического поля в зоне расположения ИО. Оценка неопределённостей выполняется в соответствии с [13, 14], используя коэффициент Стьюдента $\eta(v)$. Оценка стандартной неопределённости получается статистическими методами на основе серии повторных наблюдений (тип А) и зависит от числа степеней свободы и уровня доверия (обычно 95%). Стандартная неопределённость каждого вклада в измерительную систему ($u(x_i)$) преобразуется в выходную величину с помощью коэффициента чувствительности c_i как

$$u_i(y) = c_i u(x_i). \quad (4)$$

Основная комбинированная неопределенность рассчитывается по закону распространения неопределенности при условии независимости вносимых вкладов измерительного оборудования в измерительную установку как

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} u_i^2(y)}. \quad (5)$$

Расширенная неопределенность определяется как

$$U = k u_c(y), \quad (6)$$

где коэффициент охвата $k = 2$ соответствует уровню доверия 0,95 для нормального распределения.

Для испытаний на устойчивость к излучаемым помехам в БЭК основными компонентами, вносящими вклад в неопределённость при измерениях по стандарту (IEC 61000-4-3), являются: неопределенность калибровки датчика поля, допуск установки напряженности поля в ПО, погрешность измерения прямой мощности, вклад гармоник усилителя мощности, вариация напряженности поля из-за изменения коэффициента стоячей волны для антенны, несовершенства БЭК, а также неопределенность типа А, обусловленная повторяемостью измерительной системы, определяемая при серии калибровок [14]. Перечень источников неопределенности результатов измерений для измерения напряженности поля представлен в таблице 2.

Процедура калибровки однородности поля в БЭК для номинального уровня напряженности электрического поля 3 В/м предусматривает два возможных подхода к установке уровня воздействия с учётом неопределенности измерений (таблица 2).

1. Если заданный уровень воздействия установлен равным номинальному значению 3 В/м (без суммирования погрешностей), то вероятность соответствия реальной амплитуды электрического поля требованию стандарта составляет не более 50%.
2. Обеспечение доверительной вероятности не менее 95%, подтверждает, что ИО подвергается воздействию не ниже заданного уровня. Для этого необходимо скорректировать установленное значение путём добавления расширенной неопределённости к номинальному уровню. В приведённом примере это приводит к установке уровня 3,66 В/м.

Таблица 2 – Источники неопределённости измерений напряжённости поля при испытаниях на помехоустойчивость в БЭК [14]

Источник неопределённости измерений	**Значение, дБ**	**Делитель**	$u_i(y)$	$u_i(y)^2$
Калибровка датчика поля	1,2	2,000	0,600	0,360
Допуск по напряженности поля	0,5	1,732	0,289	0,083
Измерение мощности, подводимой к антенне	0,2	1,732	0,115	0,013
Гармоники усилителя	0,4	1,732	0,231	0,053
Антенна	0,3	1,732	0,173	0,030
Влияние БЭК	1,0	1,732	0,577	0,333
Повторяемость измерительной системы	0,5	1,000	0,500	0,250
Комбинированная стандартная неопределенность	**1,060**			
Возросшая неопределенность	**1,123**			
Множитель тестового уровня	**1,740**			

Методы минимизации числа итераций

Поиск значения мощности, при которой создается требуемая напряженность поля, может быть выполнен методом полного перебора. При этом большое число итераций существенно замедлит калибровку и испытания, поскольку ключевой операцией, определяющей вычислительные затраты в процессе автоматизированных измерений, является взаимодействие с измерительным оборудованием. В прикладной информатике и математике данная проблема решается с помощью специальных методов оптимизации, позволяющих найти значение целевой функции за минимальное число итераций [15]. В связи с тем, что измерительное оборудование имеет разное время для формирования ответа на запрос ПО, основная задача при автоматизации сводится к минимизации числа итераций взаимодействия с измерительным оборудованием и сохранению точности измерений.

Для этого целесообразно применить классические методы поиска корней, характеризующиеся низкой частотой взаимодействия с функцией ошибки. К числу наиболее эффективных из них относятся методы бисекции, основанные на теореме Больцано-Коши о промежуточном значении [16], а также различные интерполяционные [17] и гибридные методы [18], позволяющие найти решение за малое число итераций. Для всех методов функция ошибки определяется как

$$f(P_{\text{прям.}}) = E(P_{\text{прям.}}) - E_{\text{треб.}}. \quad (7)$$

Задача поиска формулируется следующим образом: надо найти такое $P_{\text{прям.}}$, при котором $E(P_{\text{прям.}}) = E_{\text{треб.}}$ с заданным допуском (абсолютной погрешностью) на интервале $[P_{\text{мин}}, P_{\text{макс}}]$, определённом диапазоном выходной мощности системы. Методы, применяемые в задачах поиска решения при автоматизации процесса измерений, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Методы поиска корней

Название метода	Описание
Bisection	Метод многократно делит пополам интервал, в котором, находится корень
Newton [19]	Метод касательных, использующий информацию о производной функции
Secant [20]	Метод, аппроксимирующий производную с помощью конечных разностей
AndersonBjorck [21]	Модификация Regula Falsi, улучшающая сходимость путем корректировки значения функции на границе интервала
Dekker [22]	Гибридный метод, использующий методы бисекции и секущих
Chandrupatla [23]	Гибридный метод, использующий методы бисекции и обратную квадратичную интерполяцию
Illinois [24]	Модификация Regula Falsi, использующая иной корректирующий коэффициент для повышения эффективности
Adaptive	Адаптивный метод, регулирующий размер шага в зависимости от поведения функции ошибки
Brent [25]	Гибридный метод, комбинирующий обратную квадратичную интерполяцию и метод бисекции
Toms748 [26]	Метод построения доверительных интервалов

Вычислительный эксперимент

Разработана комплексная модель измерительной установки для проведения вычислительного эксперимента, включающая модели измерительного оборудования с возможностью учета неопределенности измерений. Модель генератора сигналов (ГС) имитирует реальный прибор, с ограничением по минимальной ($P_{мин}$ = минус 60 дБм) и максимальной ($P_{макс}$ = 20 дБм) выходной мощности сигнала, а также с минимально возможным шагом 0,01 дБм. Датчик поля (ДП) описан по (3), а датчик мощности (ДМ) как устройство без ограничений по максимальной входной мощности. В качестве модели усилителя мощности (УМ) выбрана нелинейная модель обеспечивающая работу вблизи точки компрессии 1 дБ, широко распространённая в задачах ЭМС с усилением 40 дБ. Антенна выбрана как типовая для испытаний на помехоустойчивость в БЭК, а именно логопериодическая с коэффициентом усиления 8 дБи. Для учёта неопределённости измерений каждая модель устройства дополнялась погрешностями измерений из таблицы 2.

Схема комплексной модели измерительной установки для проведения вычислительного эксперимента представлена на рис. 2. Вычислительный эксперимент и анализ результатов проводились с использование библиотеки SciPy [27].

Сначала применимость рассматриваемых методов поиска оценена на вычислительном эксперименте без учета неопределённостей измерений. Методами находилось значение $E_{треб.}$=1, 3, 10, 30 В/м с абсолютной погрешностью не более 0,1 В/м на расстоянии 1 м и ограничением по максимальному числу итераций $n = 50$. Результаты представлены в таблице 4, (ошибка вычисления напряжённости электрического поля (Δ) и число итераций (n)), а зависимости

напряжённости электрического поля от *n* в процессе вычислений представлены на рис. 3.

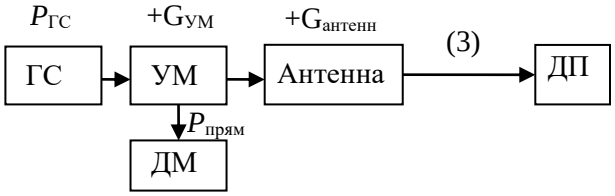


Рис. 2. Схема комплексной модели измерительной установки

Таблица 4 – Результаты вычислительного эксперимента

Метод	**1 В/м**		**3 В/м**		**10 В/м**		**30 В/м**	
	Δ, В/м	***n***	**Δ, В/м**	***n***	**Δ, В/м**	***n***	**Δ, В/м**	***n***
Bisection	0,060	5	0,020	5	0,090	7	0,020	10
Newton	0,030	10	0,030	6	0,020	9	9,600	4
Secant	0,950	23	0,400	12	0,360	10	0,370	11
AndersonBjorck	0,090	31	0,060	17	0,060	6	0,050	6
Dekker	0,050	7	0,040	6	0,050	6	0,050	6
Chandrupatla	0,010	7	0,030	7	0,090	9	0,020	12
Illinois	0,020	10	0,090	9	0,010	9	0,010	8
Adaptive	0,060	7	0,030	8	0,100	11	0,020	15
Brent	0,001	10	0,001	10	0,001	8	0,010	8
Toms748	0,003	10	0,010	10	0,001	11	0,001	9

Из таблицы 4 видно, что методы поиска демонстрируют разную эффективность при достижении целевых значений напряженности поля ($E_{треб.}$) с абсолютной погрешностью не более 0,1 В/м. Методы Deker, Brent и Bisection выделяются наименьшим средним числом итераций 6,75, 9,25 и 7,25 соответственно, обеспечивая быструю сходимость с заданной точностью. Высокие уровни ошибок у методов Newton и Secant (6,8 и 0,95 В/м) связаны с чувствительностью к начальному приближению и свойствам функции ошибки. Результаты показывают преимущество гибридных и бисекционных подходов для решения поставленной задачи, так как применение данных методов позволяет существенно уменьшить число итераций и достичь заданной точности.

Методы поиска оценены также при имитации реальных условий, используя вычислительный эксперимент с учётом неопределённости измерений методом Монте-Карло. В процессе вычисления к каждой модели измерительного оборудования добавлялась случайная погрешность. Затем многократно (N = 1000) выполнялась генерация вектора параметров в пределах их допустимых значений. На каждой итерации в результат измерения вносилась случайная погрешность в соответствии с бюджетом неопределённости, приведённым в таблице 2.

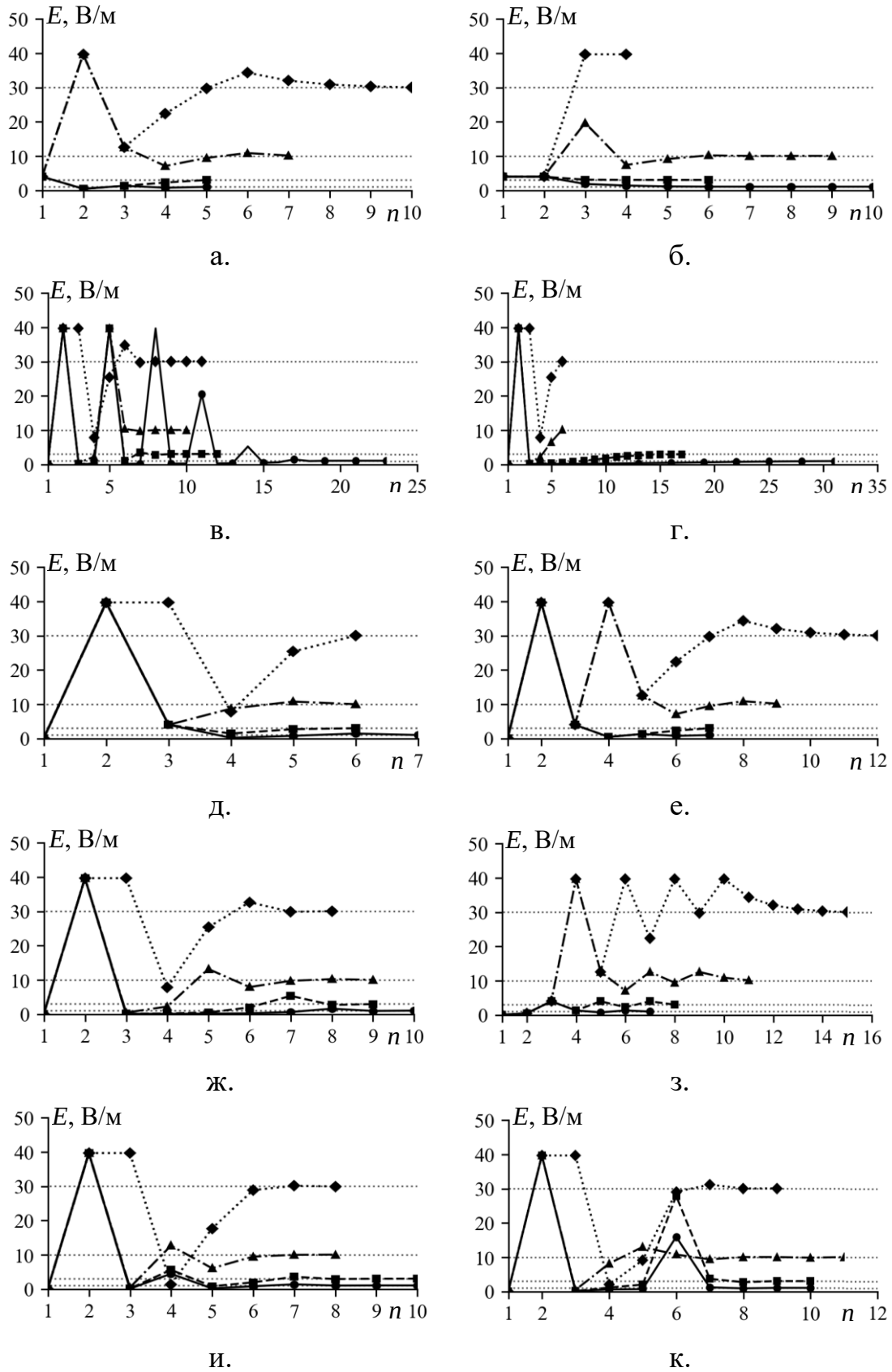


Рис. 3. Зависимости напряжённости электрического поля от n для $E_{треб.}$=1 (●), 3 (■), 10 (▲) и 30 (◆) В/м, полученные без учёта неопределённости измерений методами: Bisection (а), Newton (б), Secant (в), AndersonBjorck (г), Dekker (д), Chandrupatla (е), Illonis (ж), Adaptive (з), Toms748 (и) и Brent (к)

Методами решалась задача поиска $E_{треб.}$ = 1, 3, 10, 30 В/м с абсолютной погрешностью, учитывая неопределённость измерений для каждого из уровней: 0,20, 0,66, 2,20 и 6,65 В/м, соответственно. При использовании метода Монте-Карло каждая итерация при калибровке рассматривалась как случайный вычислительный эксперимент. Для каждой итерации i в ходе вычислительного эксперимента сначала генерировался вектор неопределённости $u_i \sim D$, где D объединяет все распределения неопределённости. Затем выполнялась минимизация функции ошибки $f(P, u_i)$. Результаты объединялись по всему количеству векторов (N), что позволило учесть число итераций и точность решения, определяющие эффективность метода. Для оценки обеих величин рассчитывалось среднее значение и среднеквадратическое отклонение (СКО). Числом итераций определяется количество запросов к измерительному оборудованию. Чем меньшее число итераций, тем меньше время калибровки и износ оборудования. Точность калибровки определяется погрешностью измерений. Эти критерии выбраны в качестве основных, поскольку они позволяют найти метод, удовлетворяющий ключевому требованию по достижению точного значения за малое число итераций. Результаты вычислительного эксперимента представлены в таблице 5, а зависимости напряжённости электрического поля от номера итерации для всех методов представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что методы, зависящие от вычисления производных, такие как Newton и Secant, неустойчивы к шумам. Так, метод Newton использует точные производные, которые при аппроксимации в условиях шума приводят к нестабильным значениям и отклонению от искомого значения. Метод Secant аппроксимирует значения производных с помощью секущих, но при наличии шума происходит усиление ошибки, что приводит к большому числу итераций (n=50 и 52) и большим ошибкам (до 23,96 В/м при $E_{треб.}$=30 В/м), что обусловлено чувствительностью к начальным значениям функции ошибки и локальному поведению функции. Меньшее число итераций характерно для методов с использованием интервалов, которые эффективно сокращают интервалы вдвое без вычисления производных. Метод Bisection требует, в среднем, 4,75 итерации, за счёт сокращения интервала вдвое на каждой итерации, что делает его самым быстрым. Метод Dekker и Chandrupatla достигают 5,98 и 6,22 итераций соответственно, за счёт гибридного метода секущих и деления отрезка пополам, адаптируясь к шуму, используя предыдущие результаты вычислений. Методы Brent, Illinois и Toms748 обеспечивают наименьшую погрешность для всех искомых $E_{треб.}$ и позволяют получить умеренное число итераций даже в условиях неопределенности измерений.

Таблица 5 – Результаты вычислительного эксперимента

Метод	Среднее *n*	СКО *n*	Средняя Δ, В/м	СКО Δ, В/м
$E_{треб.}$= 1 В/м				
Bisection	5,45	1,92	0,33	0,25
Newton	51,83	3,81	2,8	1,33
Secant	52,66	1,68	7,64	15,22
AndersonBjorck	20,81	3,30	0,36	0,22
Dekker	7,74	1,89	0,3	0,26
Chandrupatla	7,18	1,53	0,33	0,25
Illinois	10,39	1,83	0,32	0,24
Adaptive	6,65	2,27	0,37	0,30
Brent	12,19	1,70	0,28	0,20
Toms748	12,67	3,14	0,28	0,21
$E_{треб.}$= 3 В/м				
Bisection	4,60	2,28	0,86	0,65
Newton	46,78	11,16	1,13	0,91
Secant	51,9	3,77	6,72	12,82
AndersonBjorck	12,79	1,79	0,92	0,55
Dekker	6,06	1,82	0,92	0,72
Chandrupatla	6,22	2,10	0,83	0,57
Illinois	8,46	1,33	0,91	0,64
Adaptive	5,84	2,03	0,84	0,73
Brent	10,33	1,39	0,82	0,72
Toms748	12,05	2,08	0,73	0,55
$E_{треб.}$= 10 В/м				
Bisection	5,04	1,06	2,49	1,92
Newton	51,89	4,01	5,29	1,96
Secant	50,4	6,08	10,49	13,66
AndersonBjorck	7,1	0,93	2,00	1,44
Dekker	5,71	1,01	1,79	1,34
Chandrupatla	6,87	1,01	2,34	1,71
Illinois	7,34	1,08	2,10	1,61
Adaptive	6,95	1,14	2,94	2,05
Brent	7,93	1,09	1,98	1,26
Toms748	8,59	1,35	1,97	1,80
$E_{треб.}$= 30 В/м				
Bisection	4,40	1,24	6,51	4,88
Newton	52,14	3,22	23,96	6,42
Secant	51,31	4,14	8,61	8,56
AndersonBjorck	4,42	1,32	7,04	4,79
Dekker	4,39	1,43	7,98	6,02
Chandrupatla	4,62	1,52	8,89	5,44
Illinois	4,36	1,32	7,45	4,69
Adaptive	6,32	1,59	7,27	5,8
Brent	6,57	1,22	6,45	4,73
Toms748	7,03	1,58	6,38	5,96

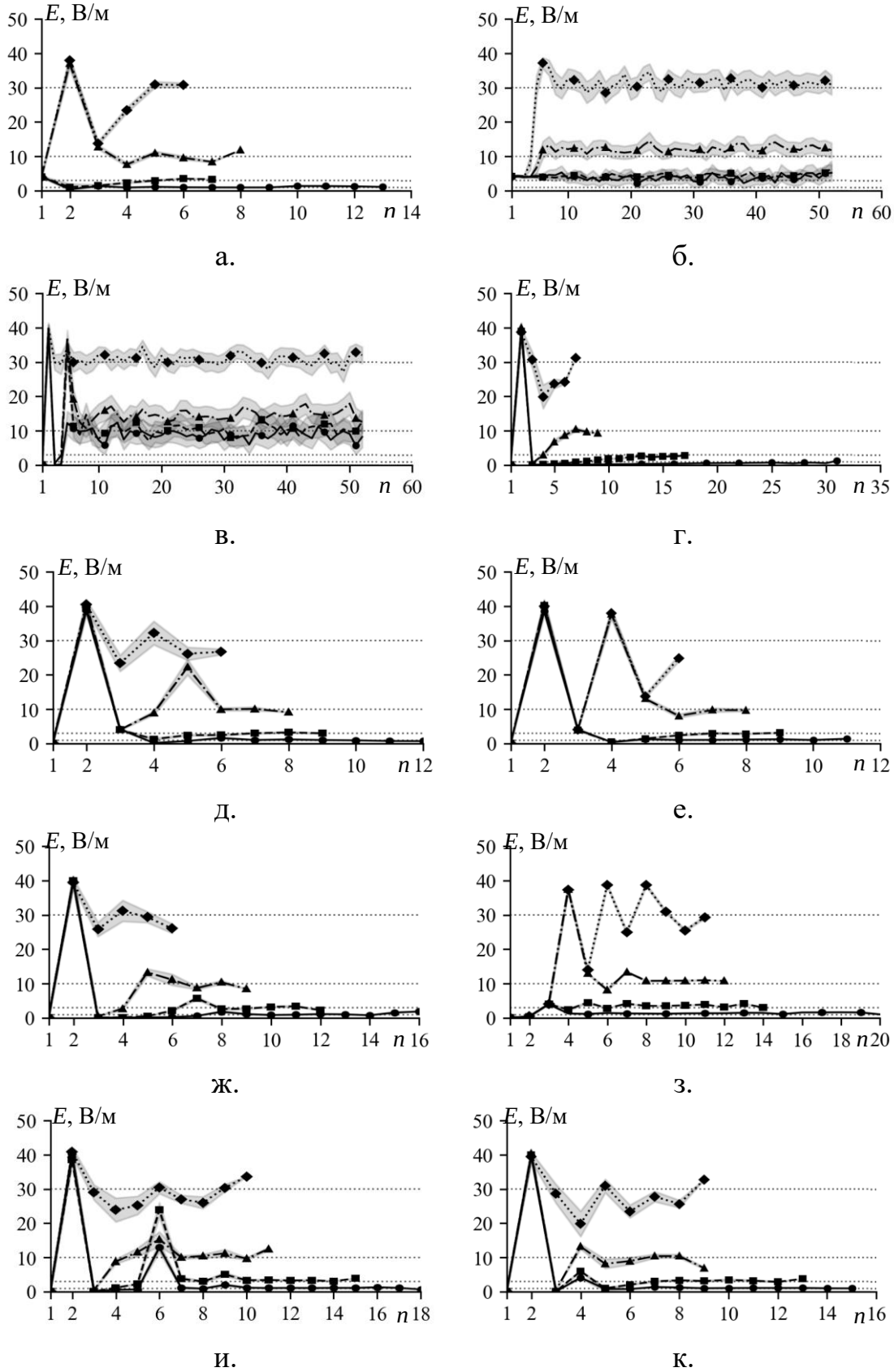


Рис. 4. Зависимости напряжённости электрического поля от n для $E_{треб.}$=1 (●), 3 (■), 10 (▲) и 30 (◆) В/м, полученные с учётом неопределённости измерений методами: Bisection (а), Newton (б), Secant (в), AndersonBjorck (г), Dekker (д), Chandrupatla (е), Illonis (ж), Adaptive (з), Toms748 (и) и Brent (к)

Заключение и выводы

Сравнены методы поиска корней для задачи калибровки однородности электромагнитного поля в БЭК с учетом неопределенности измерений. Результаты вычислительного эксперимента без учета неопределенности измерений демонстрируют преимущество гибридных и бисекционных подходов для решения поставленной задачи. Применение данных методов позволяет существенно уменьшить число итераций и достичь заданной точности. Вычислительный эксперимент с использованием метода Монте-Карло продемонстрировал, что метод Bisection обеспечивает минимальное число итераций. Методы Toms748, Illinois и Brent выделяются наибольшей точностью и имеют низкие значения ошибки, что сводит к минимуму влияние шума. Большинство методов, за исключением Newton и Secant, характеризуется достаточной робастностью, поскольку изменение уровня шума не приводит к значительному росту числа итераций или ухудшению точности, что подтверждает их применимость для минимизации итераций процесса калибровки.

На основе вычислительного эксперимента рекомендуется использование методов Bisection и Dekker в программах испытаний, в которых отдаётся приоритет минимизации времени калибровки и числу итераций взаимодействия с измерительным оборудованием, например, при частых испытаниях ИО с ограниченными ресурсами или в условиях высокой загруженности БЭК. Методы Toms748, Illinois и Brent предпочтительны в программах испытаний, при которых требуется максимальная точность измерений, таких как прецизионные испытания на ЭМС для критичных радиоэлектронных средств, где допустимая погрешность должна быть минимальна. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию гибридных подходов, сочетающих преимущества указанных методов для адаптации к конкретным условиям испытаний и измерительным установкам.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта FEWM-2026-0012 Минобрнауки России.

Литература

1. Amador E., Miry C., Bouyge N. Compatible susceptibility measurements in fully anechoic room and reverberation chamber // 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – IEEE, 2014. – P. 860–865. – DOI: 10.1109/EMCEurope.2014.6931024.

2. Lin H. N., Ho T. H., Chang W. Y., Kuo C. W. Design and application of novel stripline for IC-EMC characteristic measurement // IET Science, Measurement & Technology. 2025. Vol. 19. № 1. P. e12228. – DOI: 10.1049/smt2.12228.

3. Комнатнов М. Е. Методика проектирования устройств на основе линий передачи для испытания радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость // Доклады ТУСУР. 2025. Т. 28. № 2. С. 42–54. – DOI: 10.21293/1818-0442-2025-28-2-42-54.

4. Демаков А. В., Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р. Обзор исследований в области разработки и применения реверберационных камер для испытаний на

электромагнитную совместимость // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 2. С. 151–190. – URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/09-Demakov.pdf (дата обращения: 04.06.2026).

5. Hamann D., Garbe H., Pusch T., Suhrke M. A detailed study on TEM waveguides' field distribution and efficiency // 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). – IEEE, 2015. – P. 881–886. – DOI: 10.1109/ISEMC.2015.7256281.

6. Yao L., Lan W., Li D., Luo M. A comparison of state-of-the-art evaluation criteria for field uniformity assessment // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2022. Vol. 64. № 6. P. 1899–1905. – DOI: 10.1109/TEMC.2022.3210174.

7. Carobbi C. F. M., Lalléchère S., Arnaut L. R. Review of uncertainty quantification of measurement and computational modeling in EMC part I: Measurement uncertainty // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2019. Vol. 61. № 6. P. 1690–1698. – DOI: 10.1109/TEMC.2019.2904999.

8. Azpurua M., Paez B. E., Tremola C. A Proposed Method for Quantifying Uncertainty in RF Immunity Testing Due to EUT Presence // Progress In Electromagnetics Research B. 2011. Vol. 29. P. 175–190. – DOI: 10.2528/PIERB11020802.

9. Catrysse J., Bogaerts J., Brandt J., Monteyne N., Paquet B., Pelt M. The Requirements of a Uniform Field Distribution for Radiated Immunity: A Critical Analysis // EMC'98 ROMA International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – IEEE, 1998. – P. 701–706. – DOI: 10.23919/EMC.1998.10791743.

10. Camell D., Johnk R. T., Davis B. N., Taylor M. Verification of an EMC facility retrofit by time-domain and field uniformity measurements // 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – IEEE, 2007. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ISEMC.2007.103.

11. Friis H. T. A note on a simple transmission formula // Proceedings of the IRE. 1946. Vol. 34. № 5. P. 254-256. – DOI: 10.1109/JRPROC.1946.234568.

12. Trainotti V. Electromagnetic compatibility (EMC) antenna gain and factor // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. Vol. 59. № 4. P. 1006-1015. – DOI: 10.1109/TEMC.2016.2642833.

13. Azpurua M., Tremola C., Paez B. E. Comparison of the GUM and Monte Carlo Methods for the Uncertainty Estimation In Electromagnetic Compatibility Testing // Progress In Electromagnetics Research B. 2011. Vol. 34. P. 125–144. – DOI: 10.1109/CarpathianCC.2013.6560563.

14. Lalléchère S., Carobbi C. F. M., Arnaut L. R. Review of uncertainty quantification of measurement and computational modeling in EMC Part II: Computational uncertainty // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2019. Vol. 61. № 6. P. 1699-1706. – DOI: 10.1109/TEMC.2019.2904999.

15. Melman A. Root finding techniques that work // arXiv:2204.02326 [math.NA]. 2022. – URL: https://arxiv.org/abs/2204.02326 (дата обращения: 04.06.2026).

16. Semenov K. K., Tselishcheva A. A. Generalized interval method of bisection for metrologically based search for solutions of systems of equations with

inaccurately specified initial data // Measurement Techniques. 2019. Vol. 62. № 3. P. 193-201. – DOI: 10.1007/s11018-019-01606-0.

17. Herzog A. An iterative equation solver with low sensitivity on the initial value // Results in Control and Optimization. 2024. Vol. 14. P. 10-35. – DOI: 10.1016/j.rico.2023.100351.

18. Zobiri F., Meslem N., Bidegaray-Fesquet B. Self-triggered stabilizing controllers for linear continuous-time systems // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2020. Vol. 30. № 16. P. 6502-6517. – DOI: 10.1002/rnc.5123.

19. Pho K.-H. Improvements of the Newton–Raphson method // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2022. Vol. 408. – DOI: 10.1016/j.cam.2022.114106.

20. Argyros I. K., Khattri S. K. On the Secant method // Journal of Complexity. 2013. Vol. 29. № 6. P. 454-471. – DOI: 10.1016/j.jco.2013.04.001.

21. King R. F. Anderson-Björck for linear sequences // Mathematics of Computation. 1983. Vol. 41. № 164. P. 591-596. – DOI: 10.2307/2007695.

22. Sabharwal C. L. An iterative hybrid algorithm for roots of non-linear equations // Eng. 2021. Vol. 2. № 1. P. 80-98. – DOI: 10.3390/eng2010007.

23. Chandrupatla T. R. A new hybrid quadratic/bisection algorithm for finding the zero of a nonlinear function without using derivatives // Advances in Engineering Software. 1997. Vol. 28. № 3. P. 145-149. – DOI: 10.1016/S0965-9978(96)00051-8.

24. Dowell M., Jarratt P. A modified regula falsi method for computing the root of an equation // BIT Numerical Mathematics. 1971. Vol. 11. № 2. P. 168–174. – DOI: 10.1007/BF01934364.

25. Brent R. P. Algorithms for minimization without derivatives. – Courier Corporation, 2013. – 196 p.

26. Alefeld G. E., Potra F. A., Shi Y. Algorithm 748: Enclosing zeros of continuous functions // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). 1995. Vol. 21. № 3. P. 327-344. – DOI: 10.1145/210089.210111.

27. Virtanen P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. 2020. Vol. 17. № 3. P. 261-272. – DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

References

1. Amador E., Miry C., Bouyge N. Compatible Susceptibility Measurements in Fully Anechoic Room and Reverberation Chamber. *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Gothenburg, Sweden, IEEE, 2014, pp. 860-865. DOI: 10.1109/EMCEurope.2014.6931024.

2. Lin H. N., Ho T. H., Chang W. Y., Kuo C. W. Design and Application of Novel Stripline for IC-EMC Characteristic Measurement. *IET Science, Measurement & Technology*, 2025, vol. 19, no. 1, pp.1-18. DOI: 10.1049/smt2.12228.

3. Komnatnov M. E. Method of Designing Devices Based on Transmission Lines for Testing Radioelectronic Equipment for Electromagnetic Compatibility. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki* [Proceedings of Tomsk State University of Control System and

Radioelectronics], 2025, vol. 28, no. 2, pp. 42-54. DOI: 10.21293/1818-0442-2025-28-2-42-54 (in Russian).

4. Demakov A. V., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Review of Research in the Development and Application of Reverberation Chambers for Electromagnetic Compatibility Tests. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 2, pp. 151-190. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/09-Demakov.pdf (accessed 04.06.2026) (in Russian).

5. Hamann D., Garbe H., Pusch T., Suhrke M. A Detailed Study on TEM Waveguides' Field Distribution and Efficiency. *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*. IEEE, 2015, pp. 881-886. DOI: 10.1109/ISEMC.2015.7256281.

6. Yao L., Lan W., Li D., Luo M. A Comparison of State-of-the-Art Evaluation Criteria for Field Uniformity Assessment. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, vol. 64, no. 6, pp. 1899-1905. DOI: 10.1109/TEMC.2022.3210174.

7. Carobbi C. F. M., Lalléchère S., Arnaut L. R. Review of Uncertainty Quantification of Measurement and Computational Modeling in EMC part I: Measurement Uncertainty. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, vol. 61, no. 6, pp. 1690-1698. DOI: 10.1109/TEMC.2019.2904999.

8. Azpurua M., Paez B. E., Tremola C. A Proposed Method for Quantifying Uncertainty in RF Immunity Testing Due to EUT Presence. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2011, vol. 29, pp. 175-190. DOI: 10.2528/PIERB11020802.

9. Catrysse J., Bogaerts J., Brandt J., Monteyne N., Paquet B., Pelt M. The Requirements of a Uniform Field Distribution for Radiated Immunity: A Critical Analysis. *EMC'98 ROMA International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 1998, pp. 701-706. DOI: 10.23919/EMC.1998.10791743.

10. Camell D., Johnk R. T., Davis B. N., Taylor M. Verification of an EMC Facility Retrofit by Time-Domain and Field Uniformity Measurements. *2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2007, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ISEMC.2007.103.

11. Friis H. T. A Note on a Simple Transmission Formula. Proceedings of the IRE, 1946, vol. 34, no. 5, pp. 254-256. DOI: 10.1109/JRPROC.1946.234568.

12. Trainotti V. Electromagnetic compatibility (EMC) Antenna Gain and Factor. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 1006-1015. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2642833.

13. Azpurua M., Tremola C., Paez B. E. Comparison of the GUM and Monte Carlo Methods for the Uncertainty Estimation In Electromagnetic Compatibility Testing. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2011, vol. 34, pp. 125-144. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2013.6560563.

14. Lalléchère S., Carobbi C. F. M., Arnaut L. R. Review of Uncertainty Quantification of Measurement and Computational Modeling in EMC Part II: Computational Uncertainty. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, vol. 61, no. 6, pp. 1699-1706. DOI: 10.1109/TEMC.2019.2904999.

15. Melman A. Root Finding Techniques that Work. arXiv, 2022 DOI: 10.48550/arXiv.2204.02326.

16. Semenov K. K., Tselishcheva A. A. Generalized Interval Method of Bisection for Metrologically Based Search for Solutions of Systems of Equations with Inaccurately Specified Initial Data. *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 3, pp. 193-201. DOI: 10.1007/s11018-019-01606-0.

17. Herzog A. An Iterative Equation Solver with Low Sensitivity on the Initial Value. *Results in Control and Optimization*, 2024, vol. 14, pp. 10-35. DOI: 10.1016/j.rico.2023.100351.

18. Zobiri F., Meslem N., Bidegaray-Fesquet B. Self-Triggered Stabilizing Controllers for Linear Continuous-Time Systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2020, vol. 30, no. 16, pp. 6502-6517. DOI: 10.1002/rnc.5123.

19. Pho K.-H. Improvements of the Newton–Raphson Method. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2022, vol. 408. DOI: 10.1016/j.cam.2022.114106.

20. Argyros I. K., Khattri S. K. On the Secant Method. *Journal of Complexity*, 2013, vol. 29, no. 6, pp. 454-471. DOI: 10.1016/j.jco.2013.04.001.

21. King R. F. Anderson-Björck for Linear Sequences. *Mathematics of Computation*, 1983, vol. 41, no. 164, pp. 591-596. DOI: 10.2307/2007695.

22. Sabharwal C. L. An Iterative Hybrid Algorithm for Roots of Non-Linear Equations. *Eng*, 2021, vol. 2, no. 1, pp. 80-98. DOI: 10.3390/eng2010007.

23. Chandrupatla T. R. A New Hybrid Quadratic/Bisection Algorithm for Finding the Zero of a Nonlinear Function without Using Derivatives. *Advances in Engineering Software*, 1997, vol. 28, no. 3, pp. 145-149. DOI: 10.1016/S0965-9978(96)00051-8.

24. Dowell M., Jarratt P. A Modified Regula Falsi Method for Computing the Root of an Equation. *BIT Numerical Mathematics*, 1971, vol. 11, no. 2, pp. 168-174. DOI: 10.1007/BF01934364.

25. Brent R. P. *Algorithms for Minimization without Derivatives*. Mineola, New York, Dover Publications, 2013, 196 p.

26. Alefeld G. E., Potra F. A., Shi Y. Algorithm 748: Enclosing Zeros of Continuous Functions. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 1995, vol. 21, no. 3, pp. 327-344. DOI: 10.1145/210089.210111.

27. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E., Haberland M., Reddy T., Cournapeau D., Burovski E., Peterson P., Weckesser W., Bright J., van der Walt S. J., Brett M., Wilson J., Millman K. J., Mayorov N., Nelson A. R. J., Jones E., Kern R., Larson E., Carey C. J., Polat İ., Feng Y., Moore E. W., VanderPlas J., Laxalde D., Perktold J., Cimrman R., Henriksen I., Quintero E. A., Harris C. R., Archibald A. M., Ribeiro A. H., Pedregosa F., van Mulbregt P., SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 261-272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

Статья поступила 17 июня 2026 г.
Одобрена после рецензирования 27 октября 2026 г.
Принята к публикации 12 ноября 2026 г.

Информация об авторах

Семенюк Валерий Александрович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, автоматизация процесса измерений, неопределенность измерений. E-mail: valerii.a.semeniuk@tusur.ru

Газизов Тальгат Рашитович – заведующий кафедрой телевидения и управления, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, устройства защиты, компьютерное моделирование. E-mail: talgat.r.gazizov@tusur.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

Minimizing iterations in field uniformity calibration for radiated immunity testing of electronic devices in a fully anechoic chamber

V. A. Semenuik, T. R. Gazizov

Purpose. *Calibration of electric field uniformity in an anechoic chamber is essential for validation of electromagnetic compatibility testing. Existing iterative calibration methods often require a large number of iterations, which increases time costs and accelerates wear of measurement equipment. Applying root-finding methods to minimize the number of iterations can accelerate the calibration process; however, their efficiency and robustness under conditions close to real measurements remain insufficiently studied.* ***The aim of this paper*** *is to analyze root-finding methods for minimizing the number of iterations in field uniformity calibration with evaluation of their robustness to measurement uncertainties using the Monte Carlo method.* ***Methods.*** *Hybrid and bisection root-finding methods are used to minimize the number of iterations in the calibration process. The efficiency and robustness of the methods are assessed by Monte Carlo simulation, with measurement uncertainties artificially introduced into the computational experiment. The stopping criterion for the root-finding methods is reaching the specified electric field strength within a chosen tolerance.* ***Novelty.*** *The application of root-finding methods to minimize the number of iterations in field uniformity calibration while accounting for measurement uncertainty is proposed and validated, which reduces the time required for field uniformity calibration in a fully anechoic chamber.* ***Results.*** *A computational experiment was conducted to reach the required electric field strength with an accuracy of 0.1 V/m. Without uncertainties, the Dekker, Brent, and Bisection methods converged in 6.75, 9.25, and 7.25 iterations on average, respectively; the large errors of the Newton and secant methods are attributed to their sensitivity to the choice of initial guess. With measurement uncertainty taken into account, the Bisection method required the fewest iterations (4.75), while the Toms748 and Brent methods demonstrated the best accuracy and robustness to noise, contributing minimally to measurement uncertainty.* ***Practical relevance.*** *The advantage of hybrid and bisection methods for minimizing the number of iterations in field uniformity calibration has been established. The recommended methods reduce calibration time and test equipment wear without loss of accuracy. The proposed approach can be applied in the development and improvement of field uniformity calibration procedures for immunity testing of electronic devices in an anechoic chamber.*

Key words: *electromagnetic compatibility, field uniformity, calibration, measurement uncertainty, root-finding algorithms, Monte Carlo method.*

Information about Authors

Valerii Aleksandrovich Semeniuk – Postgraduate Student. Junior researcher at the Research Laboratory «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, automation of measurement, measurement uncertainty. E-mail: valerii.a.semeniuk@tusur.ru

Talgat Rashitovich Gazizov – Chief of television and control department, chief of the scientific research laboratory «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment». Tomsk State University of Controls System and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; protection devices, computer simulation. E-mail: talgat.r.gazizov@tusur.ru

Address: 634035, Russia, Tomsk, Lenina prospect, 40.