

Типовая конфигурация для получения эквивалентных кривых намагничивания может быть следующей:

- 1) Осесимметричная двухмерная задача;
- 2) Намагничивание производится одиночным током, текущим по оси симметрии задачи (отличия по уровню магнитной индукции от намагничивания тороидальной обмоткой менее 10 %; при этом центрально-симметричное намагничивание намного проще формализуется и позволяет избежать проблем сходимости в случае использования токонесущей поверхности для описания сечения тороидальной обмотки);
- 3) Наблюдение ведется за сечением кольца, выполненного из стали 3408 (холоднокатаная, электротехническая, анизотропная). Габариты кольца: внутренний диаметр 60 мм, толщина 0,3 мм, высота 10 мм;
- 4) В качестве основной кривой намагничивания закладывается квазистатическая характеристика, взятая из [1];
- 5) В качестве результата измерения амплитуды магнитной индукции принимается максимум средней по сечению магнитной индукции за период перемагничивания;
- 6) В качестве результата измерения амплитуды внешнего магнитного поля принимается максимум среднего по линии над верхней гранью сечения магнитного поля за период перемагничивания. Воспроизводится измерительный принцип катушки поля в отсутствии помех; Расстояние от линии до грани – 0.01 мм;
- 7) Намагничивание производится синусоидальным током. При этом магнитный поток в сечении образца несинусоидален.
- 8) Плотность разбиения для частоты 50 Гц составляет порядка 250 вершин/мм² (треугольные элементы).

Полученные численные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [1] для этого же материала на частоте 50 Гц.

Следующим после верификации шагом может являться уменьшение сечения кольца до размеров

0.3 x 0.3 мм. Это позволяет значительно снизить число конечных элементов в разбиении. Значения расчетной кривой намагничивания (РКН) при этом изменятся в сторону более высоких индукций, однако характер поведения полностью сохранится. Для того, чтобы максимально приблизить значения РКН к экспериментальным следует в свойствах стали повысить электропроводность (на сколько именно – можно узнать за несколько быстрых расчетов). Это приведет к росту уровня вихревых токов и снижению индукции. При этом увеличение числа конечных элементов для корректного воспроизведения градиента индукции будет в разы меньше, чем снижение их числа за счет уменьшения геометрии. Это позволяет рассчитывать кривые намагничивания на других частотах намного быстрее.

Далее для оценки поведения магнитопровода с одним короткозамкнутым витком можно использовать 2D приближение – сечение трубы с короткозамкнутым витком в виде противотока, смещенного от центра к периферии. В этом случае будет перемагничиваться только внутренняя часть кольца, поскольку распространение магнитного поля в этой постановке ограничивается экранирующим воздействием самого сечения (дистанция течения тока совпадает с длиной трубы). В этом случае РКН можно корректировать, вводя линейные множители для всей кривой сразу.

Метод геометрической инвариации позволяет сокращать вычислительные затраты за счет сведения задачи к анализу «минимальной» геометрии путем выбора закладываемых в расчет свойств среды. Находя баланс между эквивалентной электропроводностью и магнитной проницаемостью, можно на три-четыре порядка снизить размер итоговой конечноэлементной задачи.

Литература

1. Молотилов, Б.В. Холоднокатаные электротехнические стали / Б.В. Молотилов, Л.В. Миронов, А.Г. Петренко. – М.: Металлургия, 1989. – 168 с.

УДК 535.241.41.081:004.352

СОЗДАНИЕ СКАНЕРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ СВЕТОВОГО ПОТОКА ЛЮМЕН

Сосновский А.А., Скумс Д.В.

*Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь*

Представлены результаты работы по созданию сканера для поверхности интегрирующего шара. Сканер предназначен для оценки относительной отражающей способности внутренней поверхности интегрирующего шара ISP 2000. Описан принцип работы сканера и технические характеристики.

Введение. В 2015 году в БелГИМ были завершены работы по созданию Национального эталона единицы светового потока источников непрерывного излучения НЭ 28-16. В эталоне была схема первичного воспроизведения единицы светового потока по методу «абсолютной интегрирующей сферы». Данный метод при расчете неопределен-

ности воспроизведения требует учета неравномерности внутреннего отражающего покрытия фотометрического шара. С этой целью в 2018-2019 году БелГИМ совместно с фирмой Церсис Аналитик был создан компактный сканер поверхности фотометрического шара.

Первичное воспроизведение единицы светового потока люмена по методу “абсолютной интегрирующей сферы”

Абсолютный метод воспроизведения единицы светового потока источников излучения коррелирован с методом воспроизведения единицы силы света – канделы. Данный метод основан на применении фотометрического шара и внешнего по отношению к нему эталонного источника излучения. Эталонный световой поток создается внешним источником и попадает внутрь фотометрического шара через отверстие с калиброванной апертурой, а его значение определяется освещенностью, создаваемой на входной апертуре. Для изотропного точечного источника излучения световой поток $\Phi_{эм}$ равен:

$$\Phi_{эм} = E_v A \arcsin \theta \quad (1)$$

где E_v – освещенность на входной апертуре, лк; A – площадь входной апертуры, м².

Фотометр, с помощью которого измеряется освещенность на входной апертуре, обеспечивает прослеживаемость от единицы освещенности люкс к единице светового потока – люмену. При освещении внутренней поверхности фотометрического шара внешним источником излучения, фотометр измеряет сигнал $y_{эм}$. Если перекрыть внешний источник излучения и включить внутренний (калибруемый) источник излучения, сигнал будет равен $y_{кал}$. Зная значение светового потока $\Phi_{эм}$, приписанное внешнему (эталонному) источнику излучения, световой поток $\Phi_{кал}$ калибруемого источника излучения будет равен

$$\Phi_{кал} = f \Phi_{эм} \frac{y_{кал}}{y_{эм}} \quad (2)$$

где f – поправочный коэффициент. Для идеальной системы $f = 1$. Для реальной системы f отличен от единицы и должен быть определен в результате исследований. Поправочный коэффициент учитывает множество параметров, основными из которых являются:

- неоднородность отклика внутреннего покрытия фотометрического шара. Возникает из-за неоднородности напыления отражающего материала; наличия крепежной арматуры и защитных экранов внутри фотометрического шара; зазора между половинками, составляющими фотометрический шар и т. п. Особенно важно определить поправочный коэффициент для внешнего источника, поскольку он освещает небольшую часть внутренней поверхности фотометрического шара.

- пространственную коррекцию для калибруемого источника. Распределение излучения источника влияет на равномерность освещения внутренней поверхности фотометрического шара (пространственное распределение большинства эталонных ламп светового потока примерно однородно, поэтому определять данный фактор для каждой лампы в отдельности не требуется).

- спектральное рассогласование источников излучения. Необходимо производить поправку, если спектральные распределения эталонного и калибруемого источников излучения различаются.

Таким образом, учет неоднородности отклика внутреннего покрытия фотометрического шара является крайне желательным как для корректного воспроизведения люмена так и при рутинных измерениях светового потока.

Техническое описание и принцип работы сканера поверхности интегрирующего шара. В ходе ОКР, на основе результатов полученных с помощью макетов, было спроектировано и изготовлено устройство для оценки пространственной неоднородности в виде сканера, помещаемого на место внутреннего источника излучения. Исследования показали, что для достижения требуемой точности позиционирования необходимо применение в конструкции гироскопов. Необходимый уровень освещенности и стабильность параметров светового пятна достигается при применении в качестве источника светодиодов белого свечения. При необходимости, он может быть заменен на ультрафиолетовый светодиод, что позволит проводить исследование влияния флуоресценции покрытия из BaSO₄ на точность измерений. Кроме того, с учетом того, что в состав Национального эталона входят два фотометрических шара (диаметром 2 и 1 метр) было принято решение сделать сканер универсальным. Это было достигнуто путем включения в состав блока осветителя объектива с переменным фокусным расстоянием и минимизацией геометрических размеров сканера.

Конструктивно сканер состоит из трех основных блоков: блока ЭМ (электронный модуль с двигателем горизонтальной развертки), блока вертикальной развертки и блока осветителя. Все три блока представляют собой три сочлененных цилиндра.

Управление сканером, с целью минимизации его геометрических размеров осуществляется с помощью выносного блока управления, обеспечивающего питание сканера и его сопряжение с ПК. Соединение блока управления с ПК осуществляется с помощью USB кабеля (А-В Типа), питание блока управления выполняется от сети 230 В, Блок ЭМ включает в себя электрический шаговый двигатель горизонтальной развертки и контроллер STM 32. Встроенное программное обеспечивающее управление шаговыми двигателями горизонтальной и вертикальной раз-

вертки для движения с заданной скоростью, выполнение поиска «Нулевых» положений моторов – вертикального с использованием гироскопа, горизонтального с использованием оптического датчика. Блок вертикальной развертки включает в себя электрический шаговый двигатель вертикальной развертки, отсек укладки проводки и обеспечивает сопряжение блоков управления положением с блоком осветителя. Блок осветителя состоит из встроенного источника света на основе СИД белого свечения Cree XLamp XP-G2 на радиаторе, стабилизатора тока питания светодиода, гироскопа системы вертикальной стабилизации. Фокусировка излучения и управление величиной светового потока обеспечивается объективом «Гелиос-103» со встроенной ирисовой диафрагмой.

Сканирование внутренней поверхности шара проводится по сетке размером $5^0 \times 5^0$. В случае работы с узконаправленными лампам возможно

картирование отдельных участков поверхности. Регистрация отраженного от внутренней поверхности шара света осуществляется с помощью фотоприемника на основе трап-детектора SST-Трап С, куда он передается по оптоволоконному кабелю. Электрический сигнал измеряется с помощью мультиметра и преобразуется в программном обеспечении в величину отражающей способности данного сегмента фотометрического шара. На основе полученного массива значений строится матрица распределения относительного отклонения отражающей способности внутренней поверхности фотометрического шара и карта для визуальной оценки неоднородности. Рассчитывается поправочный коэффициент на неоднородность покрытия фотометрического шара $K_{внеш}$

для внешнего источника излучения рассчитывается по формуле:

$$K_{внеш} = \frac{1}{R_{\theta\varphi} \text{ внеш}} \quad (3)$$

где $(\theta_{внеш}, \varphi_{внеш})$ – координаты точки, освещаемой внешним источником излучения.

Поправочный коэффициент на неоднородность покрытия фотометрического шара $K_{вн}$ для внутреннего источника излучения рассчитывается по формуле:

$$K_{вн} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I(\theta_n, \varphi_m) f(\theta_n) \Delta\varphi}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M R_{\theta_n \varphi_m} I(\theta_n, \varphi_m) f(\theta_n) \Delta\varphi} \quad (4)$$

Заключение. Создан сканер для поверхности интегрирующего шара. Сканер предназначен для оценки относительной отражающей способности внутренней поверхности интегрирующего шара ISP 2000 с целью снижения неопределенности воспроизведения единицы светового потока.

Литература

1. Ohkubo, K. Integrating sphere theory for measuring optical radiation / K. Ohkubo // J. Light Vis. & Env.. – 2010. – Vol.32. – P. 57–68.
2. S Winter, M Lindemann, W Jordan, U Binder and M Anokhin, Convenient integrating sphere scanner for accurate luminous flux measurements - Metrologia 46 (2009) P. 248–251.
3. Y. Ohno, Detector-based luminous-flux calibration using the Absolute Integrating-Sphere Method – Metrologia 35 (1998). – P. 473–478.
4. Y. Ohno, New Method for Realizing a Total Luminous Flux Scale using an Integrating Sphere with an External Source, J. IES 24-1 (1995). – P. 106–115.

УДК 531.711(476)

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ-МЕТРА В ОБЛАСТИ БОЛЬШИХ ДЛИН Черепанов А.С., Макаревич В.Б.

Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь

Измерение длин линий – одна из технических областей в геодезии, строительстве от уровня развития которой во многих случаях зависит качество создания карт, планов, строительство зданий и сооружений, контроль и наблюдение динамики изменений в геологии и водном хозяйстве.

Для обеспечения национальной безопасности, интеллектуальной независимости, выпуска качественной и конкурентоспособной продукции, бесперебойного оказания метрологических услуг потребителям был создан эталон единицы длины-метра в области больших длин.

Эталон создан и исследован в период II кв. 2016 г. - I кв. 2019 г. в Республике Беларусь, в районе д. Белая Лужа Смолевичского района

Минской области в рамках задания 1.1 подпрограммы “Эталоны Беларуси” ГНТП “Эталоны и научные приборы”, 2016-2020 гг.

Эталон представляет собой комплекс средств измерений и технических средств, в состав которого входят эталонный линейный базис, состоящий из комплекта закрепленных на местности реперных знаков в количестве 9 шт и эталонного оборудования, предназначенного для исследования метрологических характеристик базиса.

Для создания и размещения линейного базиса необходимо было провести поиск и анализ конкурентоспособных мест расположения базиса, с учётом предъявляемых к нему технических,