

УДК: 621.317.39

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

**Лотоцкий В.Л.**, д.т.н., проф., Email: Lototsky@mirea.ru  
**Лузинский В.Т.**, к.т.н., доц., Email: Luzinskiy@mirea.ru  
МГТУ МИРЭА, Москва, Россия

**Аннотация.** На основе проверенных экспериментальных данных проведено обоснование принципов моделирования линейного измерительного преобразователя. Для моделирования магнитных полей на основе формулы Био-Савара-Лапласа выполнены уникальные макетные образцы, в одном из которых проводится прямое измерение магнитного поля с помощью датчика Холла, а в другом используется пробная прямоугольная рамка, подключаемая на микровольтметр.

**Ключевые слова:** линейный измерительный преобразователь, датчик Холла, микровольтметр.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE PRINCIPLES OF MODELING LINEAR TRANSDUCER

*Lototsky V.L.*, D.of Sci., prof., Email: Lototsky@mirea.ru  
*Luzinskiy V.T.*, D.ofSci., ass.prof., Email: Luzinskiy@mirea.ru  
MSTU MIREA, Moskow, Russia

**Abstract.** On the basis of experimental data verified the substantiation of principles of modeling linear transducer. For modeling of magnetic fields on the basis of formula Biot-Savart-Laplace made unique model samples, one of which is carried out by direct measurement of the magnetic field using the Hall sensor and the other using a trial rectangular frame, Link to Microvoltmeter.

**Keywords:** linear transducer, a Hall sensor Microvoltmeter.

Математическая теория какого-либо технического объекта, как правило, основывается на совокупности физически достоверных и экспериментально проверенных процессов и характеристик этого объекта.

С целью обоснования принципов моделирования электромагнитных процессов линейного измерительного преобразователя (ЛИП) были предприняты экспериментальные исследования как физических устройств, моделирующих различные процессы и явления, так и макетных и опытных образцов ЛИП.

Почти все известные методики моделирования ЛИП характеризуются отсутствием физической наглядности, поэтому применяемые в них расчетные модели вызывают у исследователя недоверие и сомнение в правильности полученных результатов. В этих случаях экспериментальное подтверждение просто необходимо. Каждый шаг

моделирования должен быть обстоятельно выверен. И только тогда полученная новая методика моделирования имеет право на широкое использование при создании новых образцов техники, в данном случае измерительной техники [1].

При формировании математической модели магнитного поля возбуждения ЛИП была поставлена и решена задача наиболее полного учета следующих важных требований, а именно:

- конечной длины измерительной линейки,
- конечной длины поперечного проводника обмотки возбуждения,
- плоский характер поперечного сечения проводников,
- немагнитный характер среды, окружающей проводники обмоток.

Каждое из перечисленных требований должно выполняться также и при проведении экспериментальных исследований.

При разработке математической модели магнитного поля возбуждения ЛИП, сначала исследовался процесс формирования магнитного поля, окружающего уединенный проводник с током, имеющий плоское сечение и конечную протяженность. Поскольку среда, окружающая плоский проводник, является немагнитной и характеризуется магнитной постоянной, то расчетная характеристика поля достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными при помощи физического моделирования на электропроводящей бумаге. Анализ полученной картины поля показывает, что при диаметрах, превышающих ширину проводника в 2,5 раза, магнитные силовые линии поля приобретают форму окружностей и, начиная с этих значений удаления, проводник может рассматриваться как нитевидный.

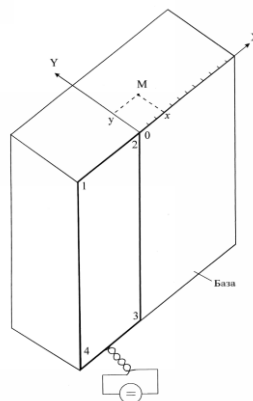
Для моделирования магнитного поля, окружающего проводник с током конечной протяженности, на основе формулы Био-Савара-Лапласа, примененной к этому проводнику, получено модифицированное выражение закона полного тока. В этом выражении соответствие между полем прямолинейного проводника бесконечной протяженности и полем прямолинейного проводника конечной длины устанавливается при помощи специального корректирующего коэффициента, позволяющего построить и проанализировать графические зависимости поля вдоль проводника при различных удалениях от него как в поперечном, так и в продольном направлениях.

Поскольку указанные зависимости получены впервые и ранее не были известны, поэтому возникла задача подтверждения достоверности и наглядности полученных результатов. Трудность восприятия этих результатов заключается в том, что в учебниках по теоретической электротехнике, даже в самых ранних, никогда не сообщалась и не анализировалась методика проведения физических опытов по

электродинамике, выполненных в начале 19 века физиками Био и Саваром, на базе которых Лаплас сформулировал закон, носящий имя этих трех ученых.

Большое недоверие вызвал сам вид характеристик магнитного поля далеко за пределами длины конечного проводника при соответствующих удалениях от оси проводника. Это потребовало проведение физического эксперимента на специальном макете, оформленном таким образом, чтобы обеспечить чистоту этого эксперимента. При всей кажущейся простоте эксперимента и известных элементах опыта (экспериментальной физики) в данном вопросе следует быть особенно внимательным. Дело в том, что в силу замкнутости линий тока изолированный проводник с током в пространстве существовать не может. В этом случае должен быть образован контур с током, составленный из испытуемого прямолинейного проводника, подводящих проводников и источника тока. Чтобы исключить дополнительные нежелательные эффекты опыта, контур должен быть выполнен в виде прямоугольной рамки, все проводники которой располагаются в одной плоскости. Для усиления эффекта и повышения чувствительности опыта рамка может выполняться многовитковой.

Схема опыта приведена на рис. 1. Здесь проводник 1-2 является испытуемым. Проводники 2-3 и 4-1 являются подводящими (выводными), они ортогональны по отношению к испытуемому проводнику, что исключает возможность их электромагнитного взаимодействия с испытуемым. Проводник 3-4 замыкает цепь контура и электрически связан с источником тока. При одновитковом выполнении рамки проводник 3-4 имеет разрыв для подсоединения к источнику тока. При многовитковом выполнении рамки разрыв имеет один из проводников участка 3-4 рамки. Для исключения влияния источника тока на качественную картину опыта к указанному разрыву от источника тока подвод осуществляется с помощью свитых вместе проводников (жгута).



**Рисунок 1. Схема опыта для исследования магнитного поля проводника с током при помощи датчика Холла**

Несмотря на многовитковое выполнение рамки поведение проводников на каждом из участков одинаково, поэтому в дальнейшем участки рамки будем представлять состоящими из одиночных проводников. В прямоугольной рамке противоположные проводники являются *коллинеарными*, а смежные проводники – *ортогональными*. Подводящие проводники, являющиеся ортогональными по отношению к испытываемому, не имеют с ним электромагнитной связи. Между собой подводящие проводники являются коллинеарными, они имеют между собой электромагнитную связь, но на качестве опыта это не отражается.

Испытуемый проводник 1-2 и проводник 3-4 коллинеарны, поэтому, чтобы уменьшить их взаимодействие, подводящие проводники должны быть как можно длиннее. Таким образом, от длины подводящих проводников будет зависеть погрешность опыта.

Поскольку пары коллинеарных проводников между собой ортогональны, поэтому прямоугольная рамка создает идеальные условия для применения принципа суперпозиции.

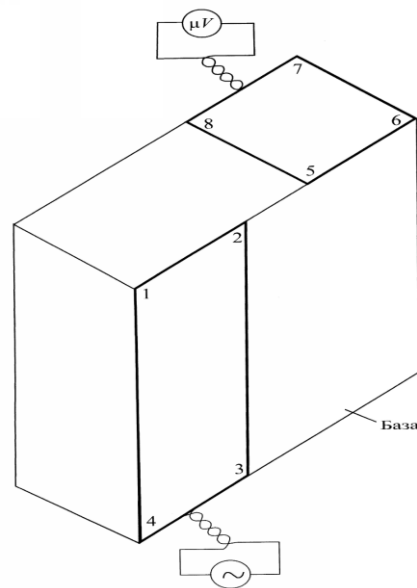
Рассмотрим схему опыта, приведенную на рис.1. В составе прямоугольной рамки проводник 1-2 является испытываемым, а подводящие проводники 2-3 и 4-1 имеют длину в несколько раз большую, чем испытываемый проводник. В плоскости, проходящей через ось испытываемого проводника и ортогональной к плоскости рамки, могут помещаться в зависимости от способа измерения напряженности (или индукции) магнитного поля либо датчик Холла, либо пробный виток (измерительные элементы).

Чтобы обеспечить ортогональность указанных плоскостей, используется соответствующая база в виде куба или бруса, изготовленная из немагнитных материалов. На одной из плоскостей базы закрепляется прямоугольная рамка таким образом, чтобы испытываемый проводник располагался вдоль одного из ребер базы. На другой плоскости базы, подходящей к этому ребру, помещаются измерительные элементы, а для удобства проведения измерительного процесса стороны этой плоскости градуируются в декартовой системе координат: вдоль ребра – ось X, ортогонально к нему – ось Y.

Если в качестве измерительного элемента используется датчик Холла, имеющий достаточно малые размеры (порядка 1 кв. мм), то имеется возможность построения зависимостей, качественно повторяющей известные зависимости. Однако количественные значения напряженностей (или индукций) в указанных кривых отличаются от теоретических значений с точностью, определяемой метрологическими возможностями самого прибора.

В качестве измерительного прибора использовался портативный миллитесламетр ТП2-2У, выпущенный по ТУ 4222-001-42294748-97. Прибор предназначен для измерения магнитной индукции постоянных и переменных магнитных полей. В качестве чувствительного элемента в приборе используется датчик Холла, вмонтированный в специальный зонд в виде иглы, конец которой, где расположен датчик, в процессе измерения помещают в нужную точку  $M(x,y)$  декартовой системы координат, разметка которой осуществлена на верхней плоскости базы. Погрешность измерения составляет 2%, что вполне достаточно для качественного описания пространственной картины поля.

Хотя принципиально в схеме опыта по рис.1 возможно также применение пробного витка, но в этом случае точные измерения осуществить нельзя. Поэтому с целью обнаружения магнитного потока, концентрические трубки которого выходят далеко за пределы испытуемого проводника вдоль линии его длины, схема опыта была изменена. Вместо пробного витка использовалась пробная прямоугольная рамка, подключенная на микровольтметр. В качестве установочной базы использовалась аналогичная база, описанная выше. Схема опыта изображена на рис. 2. Рамка с испытуемым проводником располагается так же, как и в схеме на рис.1, а плоскость пробной рамки совмещается с верхней плоскостью базы таким образом, чтобы её воспринимающий проводник 5-6 размещался на одном и том же ребре с испытуемым проводником 1-2 на некотором удалении от него.



**Рисунок 2. Схема опыта для исследования магнитного поля проводника с током при помощи пробной рамки**

Просвет между испытываемым и воспринимающим проводниками регулировался и измерялся. В качестве источника тока, питающего рамку с испытываемым проводником, применялся высокочастотный источник питания (до 100 кГц), создающий вокруг испытываемого проводника переменное магнитное поле, которое взаимодействует только с воспринимающим проводником в силу коллинеарности этих проводников. Уменьшение просвета между ними приводит к усилению их электромагнитной связи и, наоборот, при увеличении просвета электромагнитная связь ослабляется. Соответственно изменяются показания микровольтметра, регистрирующего ЭДС, наведенную в пробной рамке. Таким образом, опыт с пробной рамкой проводится в условиях формирования переменного магнитного поля.

Экспериментальные исследования, выполненные по схемам, приведенным на рис. 1 и рис. 2, наглядно подтверждают те модельные представления, которые сложились и использовались в процессе изучения особенностей формирования магнитного поля возбуждения ЛИП.

Плодотворной оказалась идея первоначального исследования магнитного поля, формируемого одиночным прямолинейным проводником с током конечной длины, с последующим распространением этих результатов на системы достаточно большого количества коллинеарных и ортогональных проводников. Это позволило широко использовать принцип суперпозиции магнитных полей, формируемых ортогональными системами коллинеарных проводников обмотки возбуждения ЛИП. Результаты моделирования достаточно физичны, их наглядность проявляется таким же образом, как на уровне опытного исследования, что особенно важно. Поэтому достоверность получения новых знаний об особенностях формирования магнитного поля возбуждения ЛИП не подлежит сомнению и может с успехом использоваться при проектировании ЛИП, особенно в плане оптимизации его важнейших параметров.

Таким образом, результаты аналитического исследования магнитного поля возбуждения ЛИП имеют достаточно серьезное опытное подтверждение.

### **Список литературы**

1. Лотоцкий В.Л., Лузинский В.Т. Инновационные предпосылки совершенствования специализированных индукционных датчиков линейных перемещений.- Научно-технический журнал «Приборы». – 2009.-№7(109).