

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ**

*Наведено результати експериментального дослідження амплітудно-фазових співвідношень для показників роботи котушок індуктивності та їхніх магнітних полів при різних конструктивних виконаннях. Дано рекомендації щодо проектування котушок із максимальною індуктивністю для заданої довжини проводу.*

*Приведены результаты экспериментального исследования амплитудно-фазовых соотношений для показателей работы катушек индуктивности и их магнитных полей при различных конструктивных исполнениях. Даны рекомендации по проектированию катушек с максимальной индуктивностью при заданной длине провода.*

*The results of experimental investigations of magnitude-phase correlations in inductance coils are presented. These results are important for the inductance coil work parameters and magnetic fields at different inductance coil design. Recommendations for the inductance coil design for the maximal value of inductance at the constant length of wire are given.*

Катушки индуктивности (КИ) широко используются при построении схем автоматического управления, электропривода, линий связи и т.п. По своему конструктивному исполнению они относятся к числу простейших элементов электрических цепей. Поэтому считается, что их поведение уже давно изучено подробно и достаточно глубоко. Однако на практике очень часто возникают и ставятся вопросы, на которые теория либо не дает ответа, либо отвечает, но в форме, которая не согласуется с экспериментальными данными. Действительно, до сих пор не разработаны приемы решения, например, таких задач:

как спроектировать КИ с максимальным значением индуктивности  $L$  при заданной длине провода  $l_{пр}$ ;

как найти оптимальные геометрические размеры КИ для заданной индуктивности  $L$ . Наряду с этим можно также утверждать, что степень изученности и описания картин магнитных полей КИ, а также амплитудно-фазовых сдвигов между напряжением  $u$ ,

приложенным к катушке, протекающим током  $i$  и ЭДС самоиндукции  $e_L$  носит явно поверхностный характер и требует дополнительных исследований.

Освещению этих вопросов и посвящена настоящая работа.

Рассмотрим прежде всего картину фазовых сдвигов. Известно [1], что напряжение  $u$  и ток  $i$  сдвинуты на  $90^\circ$ , причем напряжение опережает ток. Современные технические средства измерения (фазометры, двухлучевые электронные осциллографы и т.п.) позволяют легко проверить это положение теории и подтверждают его. Однако здесь же утверждается, что  $u$  и  $e_L$  находятся в противофазе.

Использование той же аппаратуры для проверки этого положения теории наталкивается на отсутствие рекомендаций по съему сигнала пропорционального или равного  $e_L$ .

Однако проблема отпадет, если при изготовлении КИ использовать, например, двухжильный телефонный электрический шнур. Полученное в итоге устройство будет содержать две идентичные обмотки. Из них одна может рассматриваться в качестве основной и подключаться к сети, вторая же сыграет роль измерительной.

Очевидно, что сигнал, возникающий на выходе второй обмотки, соответствует  $e_L$ . Дальнейшее измерение фазового сдвига уже не представляет труда и даст следующий результат: напряжение  $u$  и ЭДС самоиндукции  $e_{Lc}$  – это идентичные по форме синусоиды практически с одинаковыми начальными фазами, если съём сигналов выполняется с зажимов одной и той же маркировки. Поэтому векторная диаграмма КИ должна иметь графическое изображение, приведенное на рис.1.



Рис. 1. Векторная диаграмма катушки индуктивности

Ее справедливость часто отрицают доводом, что при подобном положении векторов  $\underline{U}$  и  $\underline{E}_L$  они должны суммироваться, что противоречит физическому смыслу их противодействия. Однако на анализе этого выражения останавливаться не будем, поскольку он подробно обсужден в [4].

Перейдем к рассмотрению магнитного поля КИ. Ситуацию упростим до предела, положив, что КИ состоит из одного витка. Считается, что магнитное поле кругового витка изучено во всех подробностях. Например, в работе [2] дано его графическое изображение, а для расчета магнитной напряженности  $H$  и скалярного магнитного потенциала  $\varphi$  в любой точке вне и внутри витка предложены соответствующие аналитические соотношения. По существу аналогичная информация дается и в работе [1].

Однако, несмотря на наличие рекомендаций теории, на практике даже решение такой простой задачи как построение распределения магнитной напряженности в функции координаты  $r$ , меняющейся вдоль ради-

уса в плоскости витка и за ее пределами, окажется проблематичным. Более того, не исключено, что специалист, выполнивший расчет, будет сомневаться в объективности полученной картины магнитного поля. В таком случае представят интерес результаты следующего экспериментального исследования. Оно было выполнено на круговых витках диаметром ( $2R$ ) от 20 до 400 мм из медного провода сечением  $6 \text{ мм}^2$ .

Измерения проводились на переменном токе 150 А при частоте 50 Гц. В качестве средств оценки величины магнитного поля использовались измерительные катушки диаметром 5 и 10 мм. Разумеется, что по принципу своей работы они могут дать лишь некоторое усредненное значение магнитной напряженности или магнитного потока в пределах зоны своих витков. Однако этот недостаток особого беспокойства не вызывал, поскольку нас интересуют картины магнитных полей на основе сравнительных оценок. Результаты опытных данных приведены в табл. 1. Здесь под относительным значением магнитной напряженности понимается отношение магнитной напряженности  $H$  в точке, находящейся в плоскости витка и на расстоянии  $r$  от его центра, к магнитной напряженности  $H_0$  линейного одиночного проводника при том же токе 150 А.

Подчеркнем некоторые особенности, замеченные при исследовании полей витков.

#### 1. Опытное распределение магнитного поля в катушках индуктивности

Диаметр $2R$ , мм	Относительное значение магнитной напряженности в точке с координатами $r/R$				
	Внутри витка			Вне витка	
	0	0,5	1,0	1,0	1,5
50	0,92	1,16	2,0	0,56	0,24
100	0,89	1,1	1,77	0,7	0,2
200	0,46	0,73	1,63	0,73	0,06
400	0,23	0,3	1,30	0,9	0,03

1. Магнитное поле каждого витка индивидуально и зависит от его диаметра. Снижение диаметра повышает степень равномерности магнитного поля внутри витка и степень его разреженности за пределами витка. Рост диаметра способствует созданию магнитного разрежения в центре витка. При этом различие между магнитными напряжениями при координате  $\frac{r}{R} = 1$  уменьшается и обе они приближаются к магнитной напряженности над поверхностью одиночного линейного проводника.

2. Известное заключение [3], что магнитная напряженность на расстоянии  $0,5R$  выше магнитной напряженности центра примерно на 25 % в рамках описанного эксперимента, действительно, выполняется.

Индивидуальность полей означает, что их формальное перестроение, например, в соответствии с методом подобия под любой размер не может быть оправдано. И тогда возникает вопрос о причине отмеченного разнообразия. На наш взгляд, его суть определяет известное физическое явление, согласно которому проводники с током разного направления отталкиваются. Справедливости ради следует сказать, что отталкиваются не проводники, а их магнитные поля, которые и увлекают за собой проводники. Поэтому магнитное поле любого элемента длины кругового витка испытывает отталкивающее воздействие со стороны магнитного поля остальной части того же витка, формируя при его большом диаметре магнитное разрежение в центре. При малых диаметрах работает тот же эффект, но силы сжатия становятся столь велики, что магнитные силовые линии приобретают повышенную упругость и замыкаются далеко за пределами витка, формируя перед ним область магнитного разрежения. Отсюда следует, что при вычислении магнитной напряженности в центре и в других точках плоскости витка нельзя использовать метод наложения, поскольку ни один элемент длины не позволит магнитным силовым линиям соседних с ним

элементов проникнуть в зону его собственного магнитного поля. Иначе говоря, результирующее магнитное поле витка – это не итог наложения магнитных полей его отдельных элементов, а итог их взаимного перестроения из-за силового взаимодействия.

Очевидно, что если круговому витку придать форму прямоугольника, а одной из малых его сторон предоставить свободу движения, то при расположении ее на длинных сторонах, как на рельсах, подача тока в образовавшийся контур приведет к движению проводника в сторону увеличения потягивания. Это явление описано в работе [4] и названо парадоксом Ампера, Сигалова, Пепписа, поскольку, по мнению авторов, здесь не подтверждается один из известных принципов электродинамики, что проводник с током не может взаимодействовать с собственным магнитным полем. Однако в свете описанного выше объяснения здесь нет никакого парадокса, а имеет место обычное отталкивание магнитных полей, созданных составляющими контур элементами. Аналогично могут быть объяснены и многие другие «парадоксы», описанные в упомянутой книге.

Нетрадиционный взгляд на процесс формирования магнитного поля витка определяет необходимость предложений по методике определения магнитной напряженности в любой его точке. По мнению авторов статьи, в основу ее следует положить графический метод, широко используемый, например, при расчете магнитных цепей по кривым магнитной индукции или расчет электродинамических усилий по кривым Двайта и т.д. Короче говоря, по форме табл. 1 следует создать картотеку экспериментальных данных, снятых при других сечениях провода, а затем на их основе построить удобные графические зависимости для определения  $H$  в любой зоне и точке витка.

Далее от одного витка перейдем к нескольким, намотанным «виток к витку», т.е. к устройству КИ в виде цилиндрического соленоида. Изображение картины его маг-

нитного поля приведено, например, в работе [2] в виде совокупности магнитных силовых линий 1, 2 и т.д. (рис.2).

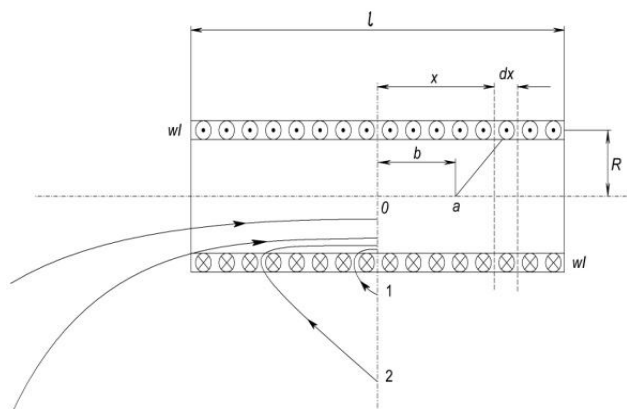


Рис. 2. Магнитное поле соленоида

Дополним эту картину результатами наших исследований, которые были выполнены на КИ тех же диаметров, что и рассмотренные выше круговые витки (за исключением диаметра 400 мм). Все они имели однослойную обмотку с числом витков 120, выполненную из медного провода сечением  $0,75 \text{ мм}^2$ . Измерения проводились посредством тех же измерительных катушек при токах 5 А промышленной частоты. Итоги исследования в относительных значениях приведены в таблицах 2 и 3 (за базовый показатель принята напряженность одиночного линейного проводника при токе 5 А).

Анализ таблиц позволяет утверждать:

1) магнитное поле внутри цилиндрического соленоида характеризуется высокой степенью равномерности и распределение плотности магнитного потока по радиусу в центральном сечении КИ имеет разницу значений не более 5 %;

2) разреженность внешнего магнитного поля непосредственно вокруг обмотки возрастает, и различие полей над и под ее витками может достигать значений десяти и более раз;

3) при движении измерительной катушки вдоль внутренней или внешней поверхности витков обмотки на расстояние примерно  $2x = 0,75l$  (рис.2) фиксируется стабильность

ее показаний. Это означает, что в пределах указанной области формируется зона, все витки которой охватываются неизменным магнитным потоком. Следовательно, здесь принципиально не может быть силовых линий, охватывающих лишь часть центральных витков обмотки (кривая 1 на рис.2). Как показали дальнейшие испытания при сматывании витков, выходящих за пределы зоны, ее геометрические размеры сохраняются;

4) при значениях  $x$  больше указанных (п.3) часть магнитных силовых линий покидает внутреннюю полость цилиндра и замыкается по пути меньшего магнитного сопротивления, вызывая рост значений магнитного поля вокруг внешних краев обмотки.

## 2. Распределение магнитной напряженности по радиусу в центре КИ

Диаметр, мм	Относительное значение магнитной напряженности в точках с координатами $r/R$				
	Внутри КИ			Вне КИ	
	0	0,5	1,0	1,0	1,5
50	45,5	46,7	46,8	0,5	0,3
100	45,0	46	46,3	2,8	1,5
200	38	39	40	5,8	4,0

## 3. Распределение магнитной напряженности по длине вдоль внутренней и внешней поверхности обмотки

Диаметр	Точки с координатами $2x/l$ (внутри)				
	0	0,25	0,5	0,75	1,0
50	46,8	46,8	46,8	46,8	30,6
100	46,3	46,3	46,3	46,3	25,1
200	40	40	40	40	20
Диаметр $2R$	Точки с координатами $2x/l$ (вне)				
	0	0,25	0,5	0,75	1,0
50	0,6	0,6	0,6	0,6	1,3
100	2,7	2,7	2,7	2,7	4,7
200	5,0	5,0	5,0	5,0	9,0

4. Опытные данные по отношению к соленоиду с диаметром 100 мм

$w/w_0$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\Phi/\Phi_0$	0,6	0,82	0,93	1,0	1,0

В процессе изготовления соленоидов одновременно был рассмотрен вопрос о зависимости магнитного потока от числа витков. Результаты опытных данных по отношению к соленоиду с диаметром 100 мм приведены в табл.4, где за базовые показатели выбраны  $w_0 = 120$  витков и магнитный поток внутренней полости КИ  $\Phi_0$ .

На графической зависимости этих данных  $\frac{\Phi}{\Phi_0} = f\left(\frac{w}{w_0}\right)$ , приведенной на рис.3,

можно видеть три участка:

линейный (рост  $\Phi$  в прямой пропорциональной зависимости от  $w$  – участок АВ);

нелинейный участок ВС

область неизменных значений  $\Phi$  – участок СД.

Отсюда следует, что однорядная обмотка соленоида имеет оптимальную длину или число витков, превышение которых не дает увеличения значений создаваемого магнитного потока. Это обстоятельство, разумеется, следует учитывать при проектировании КИ, выгодных с точки зрения экономного расхода проводниковых материалов.

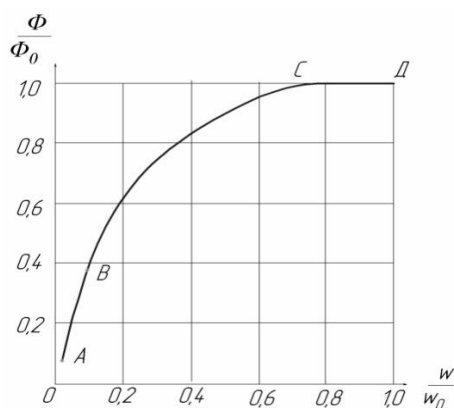


Рис.3. Изменение относительных значений магнитного потока при увеличении числа витков соленоида

Итак исследование магнитного поля соленоида показало наличие двух зон: одну из них определяют витки обмотки, которые охватываются неизменным магнитным потоком, другая характеризуется числом витков, превышение которого уже не дает приращения магнитного потока. Сопоставлением установлено, что геометрические размеры указанных зон в условиях поставленного эксперимента практически совпадают.

Далее, естественно, последовало конструктивное предложение по усилению магнитного потока за счет увеличения рядов обмотки при сохранении длины используемого провода. Конечные результаты этого экспериментального исследования для соленоида диаметром 100 мм при использовании провода сечением  $0,75 \text{ мм}^2$  приведены в табл. 5.

5. Конечные результаты экспериментальных исследований

Диаметр, мм	255	200	100	50	20
Число витков	13	15	33	57	133
Индуктивность, $\mu\text{Гн}$	85	90	93	75	41

Анализ приведенных данных показывает, что увеличение числа рядов обмотки способствует росту магнитного потока, но до определенных пределов. Так в используемой конструкции КИ эффективными оказались лишь первые восемь рядов. Намотка же двенадцати рядов привела к снижению магнитного потока, что опять же легко объясняется увеличением магнитного сопротивления на пути магнитного потока из-за роста длины магнитных силовых линий. Одновременно было установлено, что по мере увеличения числа слоев степень различия магнитного поля вокруг верхнего слоя ( $H_E$ ) и внутри нижнего слоя ( $H_H$ ) снижается, как и в случае кругового витка.

Результаты выполненного исследования с практической точки зрения интересны постановкой акцентов, например, по вопросам

проектирования КИ с максимальной индуктивностью при заданной длине провода. Очевидно, что в первую очередь здесь должен быть решен вопрос с выбором диаметра обмотки, поскольку КИ может быть исполнена либо с большим диаметром и малым количеством витков, либо многovitковой при малом диаметре.

Допустим, что поставлена задача создания КИ с максимальной индуктивностью при заданной длине провода 10 м и сечении  $0,75 \text{ мм}^2$ . Очевидно, что возможный диапазон изменения диаметра будет лежать в пределах от 3,2 м до 40 мм, поскольку дальнейшее его снижение приведет к числу витков, выходящих за пределы зоны оптимальности. Соответствующие этим диаметрам  $D$  числа витков  $w$  и значения индуктивности  $L$  (измерения проводились универсальным прибором Е7-11) приведены в табл. 6.

#### 6. Параметры катушек входящих в зону оптимальности

Число слоев	1	2	4	8	12
$\Phi / \Phi_0$	1	1,64	2,4	2,75	2,5
$H_E / H_H$	0,06	0,23	0,26	0,3	0,3

На основании этих данных построена графическая зависимость  $L = f(D)$  (рис.4).

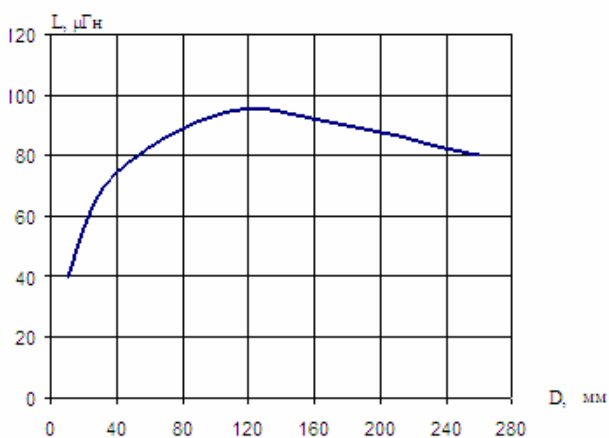


Рис.4. Зависимость  $L = f(D)$  при длине провода  $l=10$  м

Отсюда можно заключить, что искомое значение наиболее выгодного диаметра равно 120 мм. При этом на каркасе (или без него) разместится 25 витков обмотки.

Затем нужно решить вопрос о выгодном расположении витков, т.е. либо в виде однослойного, либо многослойного исполнения. Ответ на него дает табл.7, где приведены результаты экспериментальных данных по измерению индуктивности, когда уже упомянутые выше витки располагались в два, три и более слоев. Наиболее эффективным оказался вариант в четыре слоя, который дал увеличение индуктивности (по сравнению с однорядной укладкой) примерно на 30 %.

#### 7. Экспериментальные данные по измерению индуктивностей

Число слоев	1	2	4	8
Индуктивность, $\mu\text{Гн}$	93	120	130	119

Разумеется, что продолжение работы в соответствии с изложенным подходом применительно к проводам другой длины и иных сечений позволит создать расчетные кривые (наподобие кривых Двайта), которые существенно упростят проектные работы по созданию оптимальных КИ.

#### ВЫВОДЫ

1. Установлено сходство фаз напряжения, приложенного к КИ и развивающейся при этом ЭДС самоиндукции.

2. В картину магнитного поля кругового витка внесены уточнения, среди них: наличие зон магнитного разрежения в зависимости от выбранных геометрических размеров, а также акцент на присутствие сил отталкивания магнитных полей, созданных током, протекающим по элементам витка.

3. Приведена динамика изменения картины магнитного поля КИ в зависимости от геометрических размеров и расположения числа витков. Установлено наличие зоны витков соленоида, охватываемых общим

магнитным потоком, и зоны витков, выход за пределы которой не способствует увеличению магнитного потока.

4. Даны рекомендации по проектированию КИ, обеспечивающие получение максимальных значений индуктивности при заданной длине провода или других исходных условиях.

#### Список использованной литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.(Электрические цепи), (Электромагнитное поле) / Л.А. Бессонов.– М.: Высш. школа, 1978. – 528 с.

2. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля / В.А. Говорков. – М.: ГЭИ, 1960.– 462 с.

3. Китаев А.В. Причины спора по описанию поведения трансформатора / А.В.Китаев // Технич.эл.динамика. – 1998. – № 3. – С.74-76.

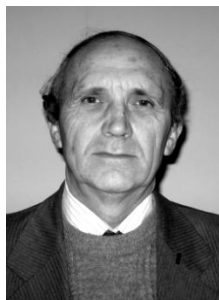
4. Николаев Г.В. Современная электродинамика и причины ее парадоксальности / Г.В.Николаев. – Томск: Изд-во Твердыня, 2003 – 149 с.

Получено 15.10.2010



Китаев Александр Васильевич, канд.техн.наук, проф.каф энергетике и электротех. Херсонск. нац. техн.ун-та.

Бериславское шоссе 24 г.Херсон, Украина, 73008, тел.+38(0552)516-468, e-mail: laurvignon@yahoo.fr



Войцеховский Александр Никифорович, доцент той же кафедры laurvignon@yahoo.fr



Войцеховский Сергей Александрович аспирант каф. технич.кибернетики, Херсонск. нац. техн.ун-та тел.+38(0552)516-468