

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕОРИИ КАТУШЕК ДЛЯ ЦЕЛЕВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Ларина Е.Ю., Ларин В.Ю.,

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра электронной техники

Abstract

Larina E.J. Larin V.J. Research of theory of spools for having a special purpose realization of measuring and managing technical devices. In the article on the basis of exposure of associative communications between dependences, describing an oscillatory circuit including L, C and the R parameters, a mathematical model and new method of decision of the controlled range of technical devices is offered

Актуальность. Применение математических моделей для построения катушек индуктивности первичных преобразователей является актуальной задачей технического задания на проектирование многих технических устройств. До настоящего времени нет единой теории, дающей ответы на все вопросы проектирования измерительных и управляющих технических средств (ИТС) и (УТС). На этой стадии проводится анализ математических зависимостей для индуктивных катушек, устанавливаются ранее неучтенные параметры, определяется их влияние на величину контролируемого диапазона. Изучение влияния конструкции и материала сердечника на параметры катушки позволит установить рабочий диапазон катушки по частоте, определить добротность, а также снизить потери в сердечнике. В процессе анализа известных решений и практических расчетов катушек индуктивности, изготавливаемых для радиоэлектронной аппаратуры, используют также эмпирические формулы, выведенные для конкретных типов и размеров сердечников при данном характере намотки. Определяется область применения, особенности условий эксплуатации, сопоставляются преимущества и недостатки аналогов и по возможности выбираются наиболее близкие технические решения.

Анализ известных решений. Поскольку катушки относятся к области магнитной техники, теоретическими предпосылками их построения являются основные законы и закономерности магнитной цепи. Расчет проводится на основании основных законов магнитной цепи. Для большего удобства проведения расчетов магнитной цепи составляется схема замещения. Построение схемы замещения магнитной цепи основано на аналогии с электрической цепью. Действительно, магнитному потоку соответствует ток, магнитодвижущей силе - э. д. с., магнитному сопротивлению - электрическое сопротивление. Основное допущение при составлении схемы замещения состоит в том, что распределенные величины заменяются сосредоточенными. Обозначения в схеме замещения принимаются следующие: источник м. д. с. обозначается как батарея или источник э. д. с.; магнитные сопротивления обозначаются как электрические. Величины и направления потоков магнитной цепи соответствуют величинам и направлениям токов полученной электрической цепи.

Расчет магнитной цепи электромагнитной катушки заключается в основном в определении связи между магнитным потоком и магнитодвижущей силой магнитной цепи и установления зависимости их друг от друга. Эта зависимость магнитного потока от м. д. с. магнитной цепи для данного конкретного магнитопровода - кривая намагничивания магнитопровода электромагнитной катушки - является основной зависимостью, на основании которой рассчитываются остальные параметры и величины, характеризующие магнитную цепь. Наиболее распространенными являются следующие зависимости:

$$\Phi^* = f(F_{M,K}), \Phi_B = f(F_{M,K}), \Phi_B = f(F_{M,B}), \Phi_B = f(F_{M,CT}),$$

где Φ^* - полный поток,

Φ_B - поток в рабочем воздушном зазоре,

F_{MK} - полные ампер-витки катушки,

F_{MB} - падение м. д. с. в рабочем воздушном зазоре;

F_{MCT} - падение м. д. с. в стали магнитопровода.

Постановка гипотез. Так как кривая намагничивания является основной зависимостью, на основании которой рассчитываются остальные параметры и величины, характеризующие магнитную цепь, то оценивать свойства технического устройства целесообразно по осциллограмме, зафиксированной на его выходе при разных значениях входной величины. Осциллограмма как бы "повторяет" кривую намагничивания, включая дополнительно гармоники, поведение которых при изменении входной величины следует исследовать. Например, принято считать, что несимметричный характер осциллограммы на измерительной обмотке ферромагнитного преобразователя (рис. 1, а) отображает характер петли гистерезиса и показывает наличие гармоник. Как известно из [1], гармонический анализ характеристик магнитоупругих преобразователей показал, что поведение гармонических составляющих отрицательно сказывается на линейности выходной характеристики ИТС. Однако до настоящего времени отсутствуют исследования поведения гармонических составляющих, которые позволили бы определить для конкретно реализуемого технического устройства наиболее эффективную информативную составляющую с точки зрения линейности характеристик. На рис. 1, б, показан способ повышения уровня выходного сигнала путем использования дополнительного источника постоянного тока. Стенд для проведения исследований в качестве образца для испытаний включал ферромагнитный первичный преобразователь (Фo-МП) с двумя скрещенными под углом 90° обмотками, пакет чувствительного элемента которого с изотропными свойствами снят с помощью четырех болтов, проходящих через его толщу. Оборудование для проведения эксперимента содержит источник переменного напряжения, источник постоянного тока Е1 типа Б5-47, выдающий напряжение 5,1В, трансформатор Тр понижающий 220/17,5 В , 50 Гц. В эксперименте использован осциллограф для получения осциллограммы выходного сигнала ферромагнитного преобразователя, web-камера для фотографирования осциллограмм и занесения их в ПЭВМ для накопления и последующего анализа.

Напряжения на первичной обмотке ферромагнитного преобразователя составляет $U_{Ld1} = 17,5В$. Ток в цепи рассчитаем как отношение падения напряжения ($U_r = 0,572В$) на двенадцатиомном резисторе в цепи, тогда

$$I_{цепи} = U_r / R = 48 мА.$$

Далее рассчитаем реактивное сопротивление первичной обмотки преобразователя и затем её индуктивность

$$X_{Ld1} = U_{Ld1} / I_{цепи} = 17,5 / 0,048 = 364 Ом,$$

$$L = X_{Ld1} / \omega = 364 / 314 = 1,161 Гн.$$

На выходе вторичной обмотки L_{d2} имеем переменное напряжение, равное 15,65В (действующее значение на выходе, измеренное вольтметром типа Ц 4313.2. В результате взаимодействия переменного и постоянного полей форма выходного сигнала сильно отличается от формы сигнала, который получается при действии только переменного напряжения. Об этом свидетельствует последовательность осциллограмм, форма которых выравнивалась при увеличении напряжения на источнике Е1 (рис. 1, в) После преобразования масштаба осциллограмм $f2$ к $f1$ и получения нормированной осциллограммы $f3$ (рис.1, г) наглядно можно обнаружить исчезновение асимметрии. Это дает право поставить гипотезы:

- о возможности аппаратного исследования природы возникновения гармоник;

- о возможности исследования поведения гармоник в выходном сигнале при воздействии на измерительное средство входной величины, изменяющейся по амплитуде в реальном времени работы ИТС, с целью получения исходной информации для построения эффективного измерительного технического средства. Эффективным будет ИТС, обеспечивающее заданный контролируемый диапазон, линейность характеристики преобразования, минимальное количество преобразовательных элементов и другие характеристики при тех же или уменьшенных массо-габаритных показателях.

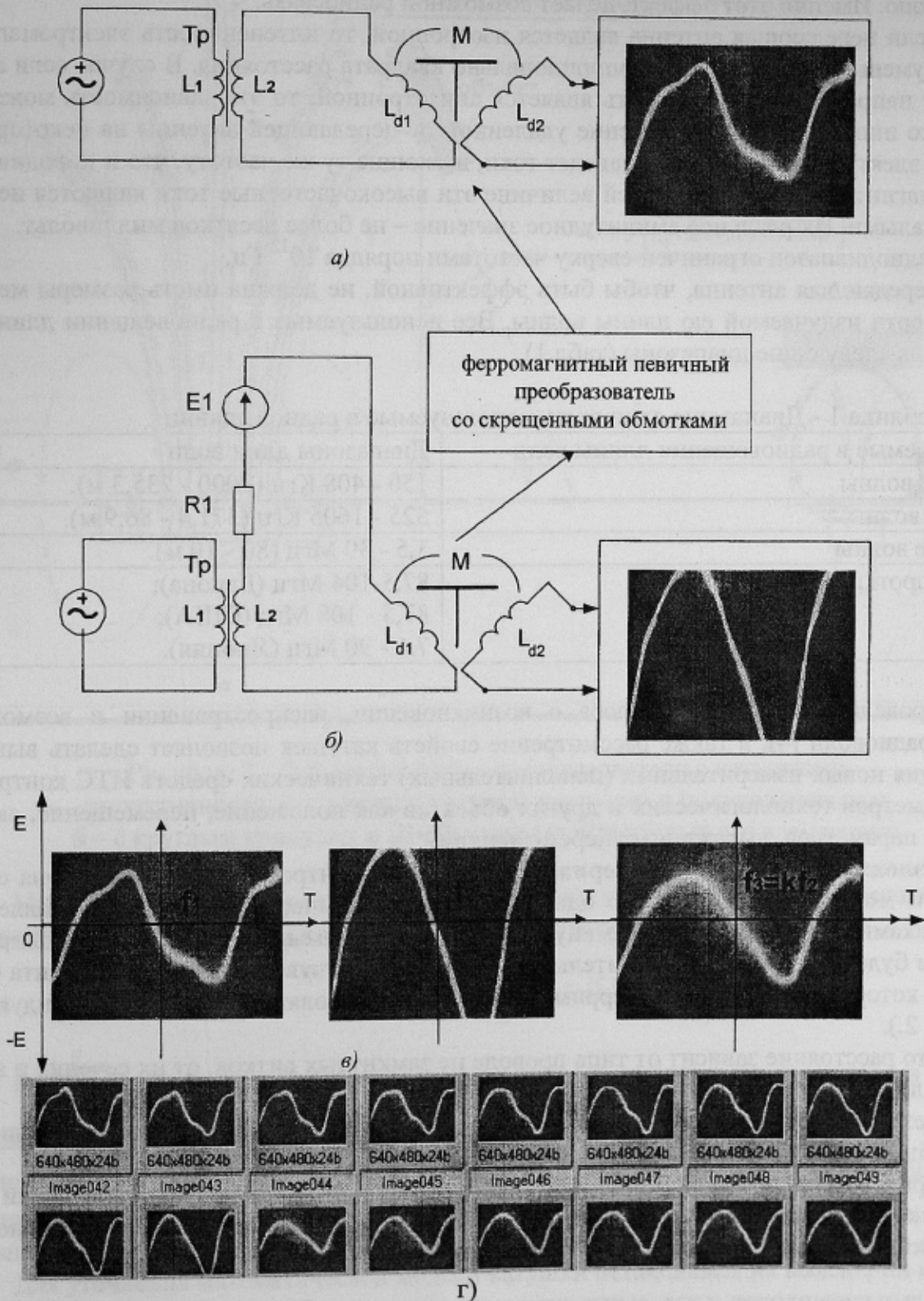


Рисунок 1 - Характер осциллограмм на измерительной обмотке Фо-МП

Исследование возможных решений аналогичных задач использования катушек в разных отраслях позволяет обнаружить важные свойства и установить взаимосвязь физических явлений. Рассмотрим на простом примере, толкование которого легко объясняет принцип действия первичных преобразователей, использующих катушки индуктивности.

Используемый в измерительной технике термин "открытый контур" - это просто техническое название для передающей и приемной антенн [2].

Токи в антенне имеют обратимый характер: распространяются то вверх, то вниз, то равны нулю. Именно этот эффект, делает возможной радиосвязь.

Если передающая антенна является изотропной, то интенсивность электромагнитной энергии уменьшается обратно пропорционально квадрата расстояния. В случае если антенна обладает направленностью, то есть является анизотропной, то эта зависимость может быть несколько иной. В приемной антенне удаленной от передающей антенны на некоторое расстояние, электромагнитное поле наведет токи, имеющие ту же частоту, что и породившие их электромагнитные волны. По своей величине эти высокочастотные токи являются исключительно малыми. Их реальное амплитудное значение – не более десятков милливольт.

Радиодиапазон ограничен сверху частотами порядка 10^{12} Гц.

Передающая антенна, чтобы быть эффективной, не должна иметь размеры менее одной четверти излучаемой ею длины волны. Все используемые в радиовещании длины волн разбиты на следующие диапазоны (табл.1).

Таблица 1 - Диапазоны длин волн, используемые в радиовещании

Используемые в радиовещании длины волн	Диапазоны длин волн
Длинные волны	150 - 408 КГц (2000 - 735,3 м).
Средние волны	525 - 1605 КГц (571,4 - 86,9 м).
Короткие волны	3,5 - 30 МГц (80 - 10 м).
Ультракороткие волны	87,5-104 МГц (Европа); 87,5 - 108 МГц (США); 7.6 - 90 МГц (Япония).

Проведенный анализ вопроса о возникновении, распространении и возможности приема радиоволн [4], а также рассмотрение свойств катушек позволяет сделать вывод для построения новых измерительных (исполнительных) технических средств ИТС контроля таких параметров технологических и других объектов как положение, перемещение, скорость и других параметров, выраженных перемещением.

Изложение основного материала. Увеличение контролируемого диапазона с помощью ИТС может быть обеспечено одним средством и вынесенными разнонаправленными проводниками – "антеннами", не замкнутыми накоротко. Замыкание витков контролируемым объектом будет возникать на значительном расстоянии от чувствительного элемента (ЧЭ), в качестве которого используется ферромагнитный преобразователь с катушками индуктивности (рис. 2.).

Это расстояние зависит от типа провода не замкнутых витков, от их сечения и эквивалентной добротности ИТС.

Незамкнутые витки могут иметь любое направление, где необходим контроль положения объекта или его механизмов.

При соответствующей мощности генерируемого сигнала незамкнутые витки могут быть замкнуты накоротко бесконтактным способом при приближении ферромагнитной массы (объекта) в зону действия магнитного поля витка.

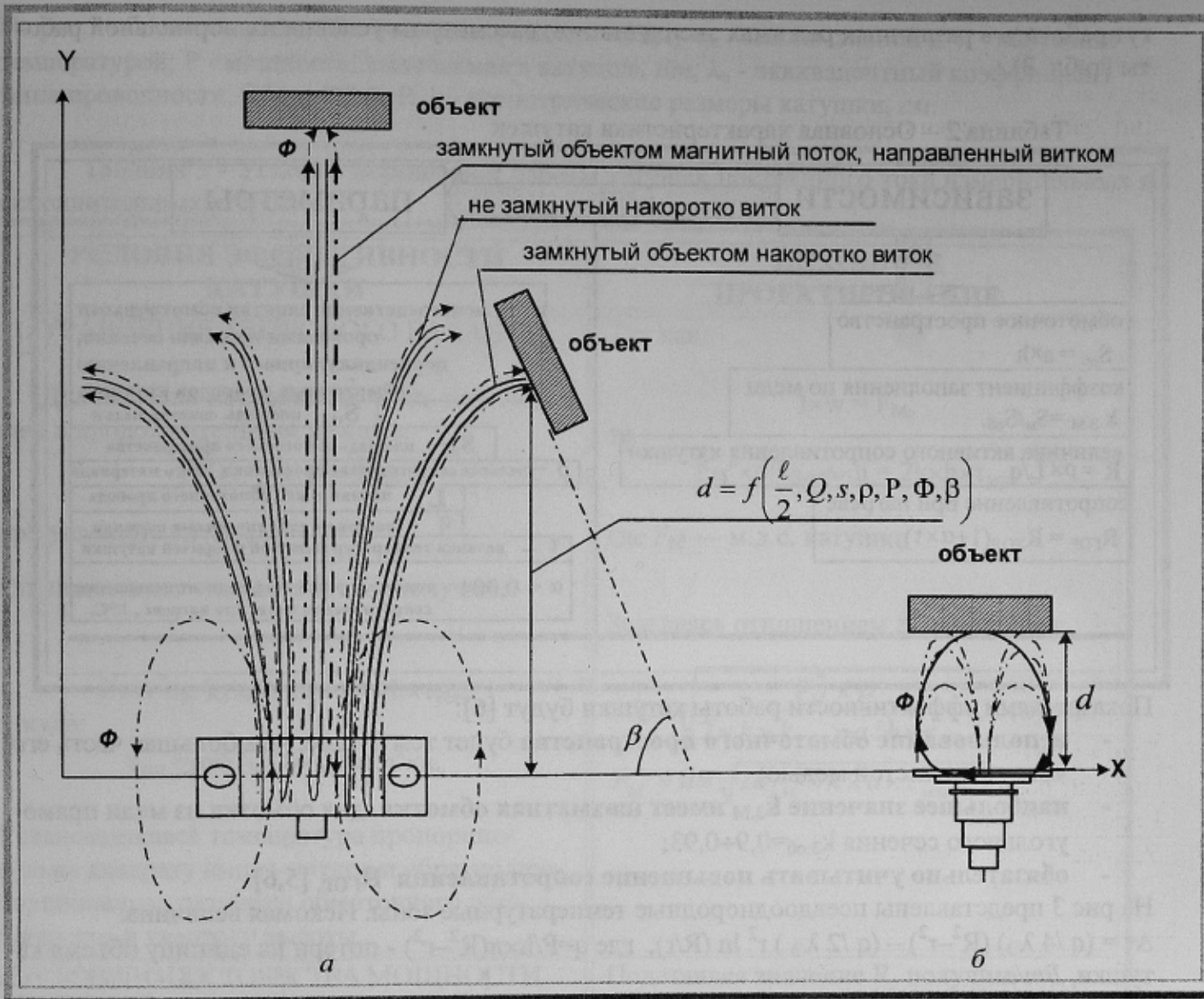


Рисунок. 2 - Ферромагнитные преобразователи с катушками индуктивности: а – с прямоугольным корпусом и полукольцевым и б – с круглым корпусом и Ш-образными чувствительными элементами

Модель эффективности катушки для требуемого контролируемого диапазона d можно представить следующей функцией, включающей множество параметров:

$$MODd = f\left(\frac{\ell}{2}, Q, s, \rho, P, \Phi, \beta\right), \quad (1)$$

где $\frac{\ell}{2}$ - длина незамкнутого накоротко витка, Q - добротность контура, s - сечение провода катушки, ρ - материал провода катушки, P - мощность, создаваемая контуром, включенным в схему автогенератора, Φ - магнитный поток создаваемый катушкой, β - угол наклона плоскостей объекта и преобразователя.

Основная характеристика катушек может быть представлена табл.2.

Для уточнения математической модели катушки остановимся на выяснении известных расчетных соотношений. Поскольку как измерительные, так и исполнительные ИТС мо-

гут работать в различных режимах эксплуатации, рассмотрим условия их нормальной работы (табл. 3).

Таблица 2 – Основная характеристика катушек

зависимости	параметры
обмоточное пространство $S_{об} = a \times h$	$S_{об}$ - непосредственно занятая обмоточными проводами площадь сечения, перпендикулярного к направлению обмоточных проводов катушки
коэффициент заполнения по меди $k_{з.м} = S_m / S_{об}$	
величина активного сопротивления катушки $R = \rho \times L / q$	S_m - площадь, занятая медью
сопротивление при нагреве $R_{гор} = R_{хол}(1 + \alpha \times \tau)$	$S_{об}$ - площадь обмоточного пространства
	ρ - удельное сопротивление проводникового материала
	L - полная длина обмоточного провода
	q - потери на единицу объема катушки
	τ - разница температур холодной и горячей катушки
	$\alpha = 0,004$ - температурный коэффициент повышения сопротивления меди при нагреве, $1/^\circ\text{C}$.

Показателями эффективности работы катушки будут [6]:

- использование обмоточного пространства будет тем лучше, чем большая часть его заполнена чистой медью;
- наибольшее значение $k_{з.м}$ имеет шахматная обмотка, для обмотки из меди прямоугольного сечения $k_{з.об} = 0,9 \div 0,93$;
- обязательно учитывать повышение сопротивления $R_{гор}$. [5,6].

На рис 3 представлены псевдооднородные температурные зоны. Искомая величина: $\Delta\tau = (q / 4 \lambda_3) (R^2 - r^2) - (q / 2 \lambda_3) r^2 \ln (R/r)$, где $q = P / h \times \pi (R^2 - r^2)$ - потери на единицу объема катушки, $\text{Вт}/\text{см}^3$.

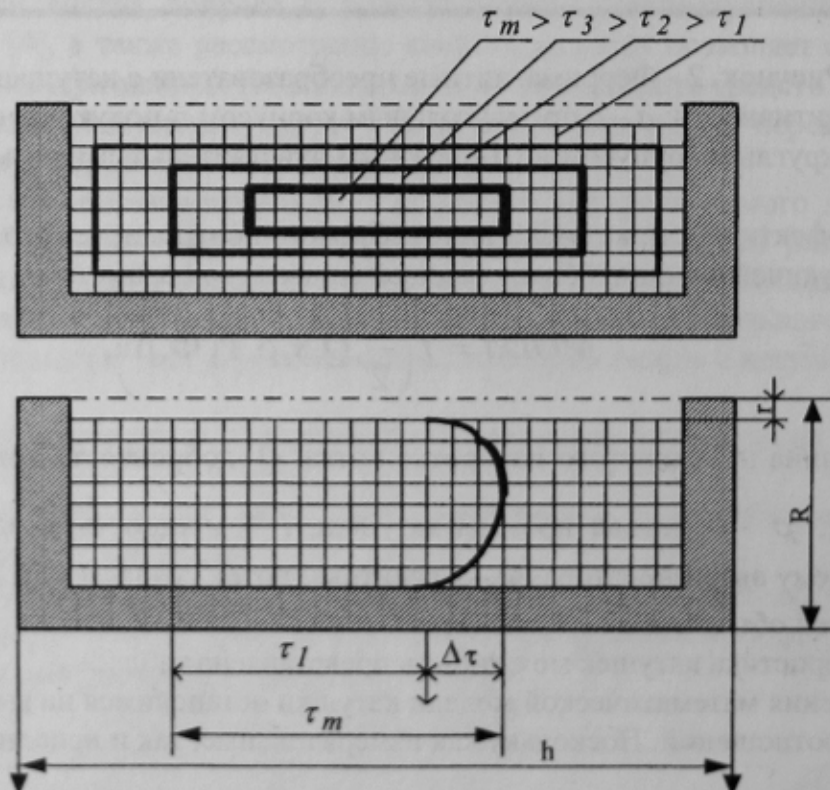


Рисунок. 3 - Псевдооднородные температурные зоны

На рис.3 обозначены: $\Delta t, ^\circ C$ - величина разницы между τ_m - максимальной и τ_1 - наружной температурой; P - мощность, выделяемая в катушке, $Вт$, λ_3 - эквивалентный коэффициент теплопроводности, $Вт/см \text{ } ^\circ C$; $h, R, г$ - геометрические размеры катушки, $см$.

Таблица 3 - Условия нормальной работы катушек постоянного тока измерительных и исполнительных устройств

УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАТУШКИ	ИСХОДНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
<p>1. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА</p> <p>Для катушки постоянного тока, работающей в продолжительном режиме:</p> $I^2 \times R = k \times S \times \tau_{уст}$ <p>при условии: $\tau_{уст} \leq \tau_{доп}$</p> <p>или подставляя значение R и S, получим:</p> $I^2 \times w^2 \times \rho / k_{3.M} \times a \times h = 2k \times h \times \tau_{уст},$ <p>откуда:</p> $\tau_{уст} = \rho \times F_M^2 / 2k_{3.M} \times k \times h^2 \times a.$ <p>Установившаяся температура пропорциональна квадрату ампер-витков и обратно пропорциональна размерам обмоточного пространства и квадрату высоты.</p>	<p>Так как</p> $I \times w = F_M,$ <p>то</p> $F_M^2 \times \rho / k_{3.M} \times a \times h = 2k \times h \times \tau_{уст},$ <p>где F_M — м.д.с. катушки</p> <p>Задаваясь отношением a/h, находим:</p> $h = \sqrt[3]{\frac{F_M^2 \times \rho}{2 \times k \times k_{3.M} \times a / h \times \tau_{доп}}}, \text{ откуда:}$ $F_M = h \times \sqrt{2k_{3.M} \times k \times a \times \tau_{уст} / \rho}.$
<p>2. УСЛОВИЕ ПОСТОЯНСТВА МОЩНОСТИ</p> $P = I^2 \times R = u^2 \times R = const$	<p>Подставляя значение R, получим</p> $P = \frac{u^2}{R} = \frac{1}{K} \left(\frac{u}{w} \right)^2 = const$
<p>3. УСЛОВИЯ ПОСТОЯНСТВА М. Д. С. и силы притяжения магнитной системы с катушками</p> $F_M = I \times w = \left(\frac{u}{R} \right) \times w = const$	<p>Подставляя значение R, получим:</p> $F_M = \frac{1}{K} \times \frac{u}{w} = const$
<p>4. УСЛОВИЕ ДЛЯ ПЕРЕСЧЕТА КАТУШКИ С ОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ДРУГОЕ</p> $u/w = const$ <p>Отношение напряжения к числу витков должно быть постоянным с катушками одинаковых размеров и одинаково заполненных</p>	<p>При разнице напряжений в 1,5÷2 раза</p>

Рекомендации для расчета катушки переменного тока и условия их нормальной работы в измерительных и исполнительных устройствах приведены в табл. 4.

Таблица 4 - Условия нормальной работы катушек переменного тока, работающих в ИТС

РАСЧЕТ КАТУШКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	КОММЕНТАРИИ
<p>ОТЛИЧИЕ и трудность расчета: величина тока определяется не только активным, но и индуктивным сопротивлением.</p> $I = u / \sqrt{R^2 + (\omega \times L)^2},$ <p>так как $X_L \gg R$, то пренебрегая R,</p> $I = u / \omega \times L.$	<p>I - ток катушки переменного тока, А, R - активное сопротивление катушки, Ом; $\omega L = X_L$ - индуктивное сопротивление катушки, Ом; ω - угловая частота переменного тока, рад/сек; L - индуктивность, Гн; u - эффект. значение напряжения, В.</p>
<p>Основная трудность в определении индуктивного сопротивления катушки, принимают</p> $L = G \times w^2.$	<p>G - проводимость магнитной системы, на которой установлена катушка, Гн;</p>
<p>Ток в катушке можно разложить на две составляющие: $I_\mu = u / \omega \times w^2 \times G$ - реактивный намагничивающий ток, создающий</p> $\Phi_{\max} = w \times I_\mu \times G \sqrt{2},$ <p>$I_{ст}$ - активный ток, компенсирующий потери в стали и вызывающий нагрев магнитопровода.</p>	<p>Φ_{\max} - максимальная величина потока, вб;</p>
<p>ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КАТУШКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА</p> $P_{ст} + P_M = k \times S \times \tau_{уст}$	<p>условно принимают, что все активные потери, вызывающие нагрев, происходят в катушке</p>
$E = 4,44 \times w \times \Phi_{\max} \times f,$ <p>или $E \approx u.$</p>	<p>E - противо-э. д. с, наводимая в катушке переменного тока, В; w - число витков; f - частота переменного тока, Гц</p>
<p>ЗНАЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ПОТОКА В СТАЛИ</p> $\Phi_{\max} = u / 4,44 \times f \times w$ <p>или:</p> $\Phi_{\max} = K \times u / w.$	<p>приняв $1/4,44 f = K$, поскольку активное падение напряжения в катушке переменного тока обычно невелико,</p>
<p>УСЛОВИЕ ДЛЯ ПЕРЕСЧЕТА КАТУШКИ С ОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ДРУГОЕ</p> $u / w = const.$	<p>чтобы сохранить постоянными поток при различных напряжениях, м. д. с. катушки и ее нагрев при одних и тех же размерах катушки и условиях работы.</p>

Основной характеристикой колебательного контура, как системы, состоящей из L , C и R , является добротность. Она определяет, как долго в контуре будут продолжаться колебания.

Таким образом, добротность может быть выражена тремя характеристиками

1. Первое представление добротности.

Численно, количество полных циклов до практически полного затухания равно добротности, т. е. добротность можно определить как

$$Q = n,$$

где n - количество полных циклов "заряд – разряд".

2. Второе представление добротности.

Колоколообразная кривая (рис.4) дает вторую, практически очень важную характеристику для Q :

$$Q = f_0 / 2 * Df,$$

где Df - полоса пропускания определяется по уровню 0,707.

Эта формула для определения добротности показывает, каким именно должно быть соотношение L и C для получения требующейся нам полосы пропускания колебательного контура.

Она обозначена как $df = 2Df$. Эта величина может быть различный, в зависимости от назначения электронного устройства.

Получение высокой добротности - это сложная, но решаемая техническая задача.

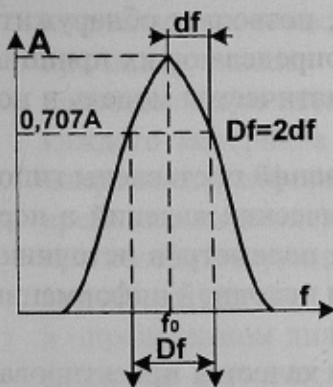


Рисунок 4 – Кривая для определения полосы пропускания колебательного контура

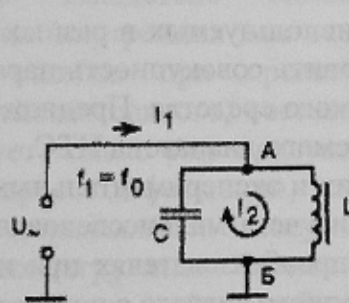


Рисунок 5 - Параллельный резонанс

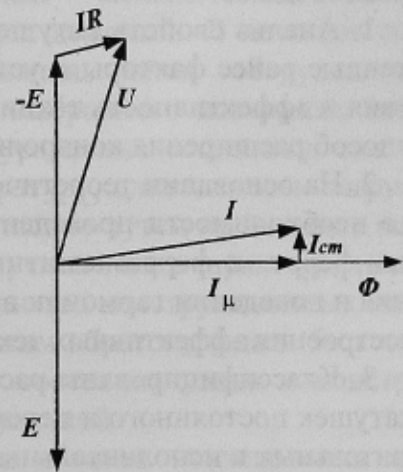


Рисунок 6 - Векторная диаграмма катушки переменного тока

3. Третье представление добротности, численно равно:

$$Q = \sqrt{\frac{L/C}{R}}.$$

Любой колебательный контур характеризуется еще и частотой резонанса, или, что адекватно, частотой собственных колебаний:

$$f_0 = 1 / (2\pi\sqrt{LC}).$$

Но есть и еще одно исключительно важное следствие. Из рис. 5 очевидно:

$$I_2 = I_1 * Q.$$

Напряжение на зажимах А и Б контура может превысить напряжение генератора. Оно превышает на частоте собственного резонанса подводимые извне колебания по амплитуде в Q раз. Но если во внешней цепи будут протекать токи, частоты которых не совпадают с резонансной, то они не создадут на зажимах контура сколько-нибудь заметного напряжения. Поэтому резонансный контур обладает частотной избирательностью.

Заслуживают также внимания зависимости, позволяющие оценить удельные потери в стали (на единицу массы магнитопровода) $Вт/кг$,

$$P_{cm} = p_2 + p_{вх} = [\sigma_2(f/100) + \sigma_{вх} \times (f/100)^2] B^2,$$

где f - частота переменного тока, Гц; B - индукция, тл; $\sigma_{вх}$ и σ_2 - коэффициенты потерь на гистерезис и вихревые токи.

Таким образом, величина потерь зависит от частоты переменного тока и от степени насыщенности магнитопровода, а также от толщины листов шихтовки магнитопровода и от его химического состава.

Выполненные исследования свойств катушек позволяют сделать вывод, что приведенная математическая модель (1) в зависимости от назначения проектируемого измерительного или исполнительного устройства может содержать те зависимости, которые отображают его принцип действия и целевое назначение.

Выводы:

1. Анализ свойств катушек, используемых в разных отраслях, позволяет обнаружить неучтенные ранее факторы и установить совокупность параметров, определяющих принцип действия и эффективность технического средства. Предложена математическая модель и новый способ расширения контролируемого диапазона ИТС.

2. На основании теоретических и экспериментальных исследований поставлены гипотезы о необходимости проведения и учета малоисследованных физических явлений в первичных ферри- и ферромагнитных преобразователях при изменении параметров источника питания и поведении гармоник выходного сигнала с целью получения исходной информации для построения эффективных технических устройств.

3. Классифицированы расчетные зависимости для повышения качества проектирования катушек постоянного и переменного тока и их надежности при работе в разных режимах измерительных и исполнительных устройств.

Литература

1. Чичикало Н.И. Структурно-алгоритмические принципы построения ИИС напряженно-деформированных объектов. – Донецьк: ДонДТУ, 1998. - 250 с.
2. Кульский А. Л. КВ приемник мирового уровня – это очень просто.
3. Ларин В.Ю., Винниченко Н.Г. Способы повышения чувствительности датчиков с ферри-магнитными первичными преобразователями.// Зб. наук. пр. Донецького нац. техн. університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. Вип. 106-107. Донецьк: ДонНТУ, 2006.
4. Ларин В.Ю. Приборы и системы на основе ферри- и ферромагнитных преобразователей. - Донецк: Норд-Пресс, 2007. - 250с.
5. Ларин В.Ю., Ларина Е.Ю., Чичикало Н.И., Штепа А.А. Информационная оценка качества измерений и моделирование процессов. - Донецк: Норд-Пресс, 2005.-210с.
6. Соболев С.Н. Расчет низковольтной электрической аппаратуры. – М.: ВШ – 1972, 264с