

# Измерение индуктивности рассеяния в трансформаторах импульсных преобразователей с помощью LRC-метра

Дмитрий Бердников (Москва)

Автор приводит способ определения коэффициента связи двухобмоточного трансформатора и параметров Т- и П-образной схем замещения по данным измерений импеданса по первичной стороне трансформатора с помощью стандартного LRC-метра. Для расчёта используются результаты измерений при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке трансформатора.

## ТРАНСФОРМАТОР С УЧЁТОМ РАССЕЯНИЯ

При анализе трансформаторных импульсных преобразователей, кроме основных параметров трансформатора (индуктивности намагничивания и числа витков обмоток), бывает необходимо учитывать его паразитные параметры, в частности, индуктивности рассеяния обмоток, или, другими словами, коэффициент связи  $K_c$ .

В импульсных преобразователях напряжения, как правило, трансформатор используется в линейной области характеристики сердечника (т.е. сердечник не насыщается), поэтому для его описания пригодна система линейных уравнений (1), а коэффициент связи в этом случае определяется по формуле (2):

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \quad (1)$$

$$u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt},$$

$$K_c = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (2)$$

В этих соотношениях  $u_1, u_2$  – напряжения на обмотках трансформатора,  $i_1, i_2$  – токи в обмотках,  $L_1, L_2$  – собственные индуктивности обмо-

ток,  $M$  – взаимдуктивность обмоток трансформатора.

Непосредственно пользоваться системой (1) при анализе преобразователей не вполне удобно, так как в неё в явном виде не входит коэффициент трансформации (отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки:  $w_1/w_2$ ). Поэтому зачастую применяются производные от схемы замещения трансформатора (1), параметры которых могут быть рассчитаны либо измерены экспериментально и отражают физические параметры трансформатора, такие как число витков обмоток, индуктивности намагничивания и рассеяния. Среди наиболее простых моделей, учитывающих рассеяние и содержащих в явном виде коэффициент трансформации, можно отметить Т- и П-образные модели [1].

На рис. 1 показана модель трансформатора, являющаяся одним из вариантов Т-образной модели. Данная модель содержит два идеальных трансформатора с коэффициентами трансформации  $w_1 : 1$  и  $w_2 : 1$  и приведённые к единичному витку: индуктивность намагничивания  $L_m$  и две индуктивности рассеяния  $L_{p1}$  и  $L_{p2}$ , связанные с соответствующими обмотками. Параметры этой модели

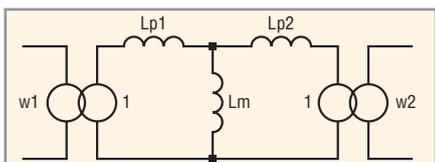


Рис. 1. Т-образная модель трансформатора

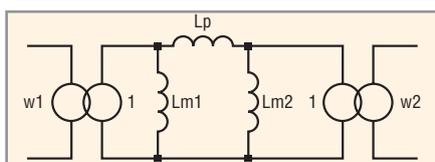


Рис. 2. П-образная модель трансформатора

связаны с параметрами системы (1) соотношениями (3) – (5):

$$L_m = \frac{M}{w_1 w_2}, \quad (3)$$

$$L_{p1} = \frac{L_1}{w_1^2} - \frac{M}{w_1 w_2}, \quad (4)$$

$$L_{p2} = \frac{L_2}{w_2^2} - \frac{M}{w_1 w_2}. \quad (5)$$

Аналогичная П-образная модель трансформатора показана на рис. 2. Её параметры связаны с параметрами системы (1) соотношениями (6) – (8), где  $L_{m1}, L_{m2}$  – индуктивности, совместно отражающие индуктивность намагничивания трансформатора, приведённую к единичному витку,  $L_p$  – общая индуктивность рассеяния трансформатора, приведённая к единичному витку:

$$L_p = \frac{L_1 L_2 - M^2}{M} \frac{1}{w_1 w_2}, \quad (6)$$

$$L_{m1} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_2 w_1^2 - M w_1 w_2}, \quad (7)$$

$$L_{m2} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 w_2^2 - M w_1 w_2}. \quad (8)$$

## ИЗМЕРЕНИЕ ИМПЕДАНСА

Методы измерения параметров различных частото-зависимых моделей трансформаторов, как правило, строятся на экспериментальном снятии частотных характеристик импеданса по первичной стороне трансформатора при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке. Для измерений применяется частотный анализатор [2], а результатом является довольно сложная модель, полно отражающая частотные характеристики трансформатора. При отсутствии специализированного оборудования трудоёмкость таких измерений высока, а сложность модели зачастую не является оправданной. Поэтому при анализе импульсных преобразователей (особенно это касается аналитических расчётов) часто пользуются подобными описанным выше простыми моделями трансфор-

матора, не учитывающими ряд второстепенных факторов (наличие резонанса, потерь в трансформаторе и др.).

Более простым и доступным средством измерения параметров частотно-зависимых моделей трансформаторов, учитывающих рассеяние, является стандартный LRC-метр. В статье [3] был показан метод определения коэффициента связи трансформатора и параметров T-образной модели с помощью измерителя LRC. Однако этот метод хорош для случая, когда число витков вторичной обмотки достаточно велико, чтобы можно было LRC-метром с достаточной точностью измерять величину индуктивности и сопротивления обмотки. Если величина индуктивности по вторичной стороне имеет порядок единиц микрогенри, а сопротивление – единиц миллиом, то точности измерений для определения параметров T-образной модели будет не хватать, поскольку измеряемые величины окажутся на уровне цены деления самого прибора. Трансформаторы, предназначенные для использования в современных импульсных преобразователях с частотами преобразования выше 100 кГц и выходными напряжениями 3...5 В, могут содержать во вторичной обмотке очень мало витков (вплоть до одного витка) и иметь параметры вышеуказанного порядка. Для таких трансформаторов целесообразно измерения проводить только по первичной обмотке, имеющей достаточно большое число витков и соответственно импеданс, поддающийся измерению LRC-метром.

Особенностью использования LRC-метра является измерение импеданса на фиксированной частоте (1 кГц), которая, как правило, существенно ниже частоты, на которой используется трансформатор (20...500 кГц). Поэтому обязательно надо учитывать резистивную составляющую, которая на низкой частоте для этих трансформаторов существенна и играет важную роль в методике определения параметров трансформатора при измерении импеданса по первичной обмотке при разомкнутой либо замкнутой вторичной обмотке.

На рис. 3 показаны расчётные амплитудно-частотные характеристики импеданса трансформатора. Трансформатор рассчитан на работу в преобразователях с частотой коммутации 100 кГц.

Как видно из рисунка, в области частот выше 100 кГц (область рабочих

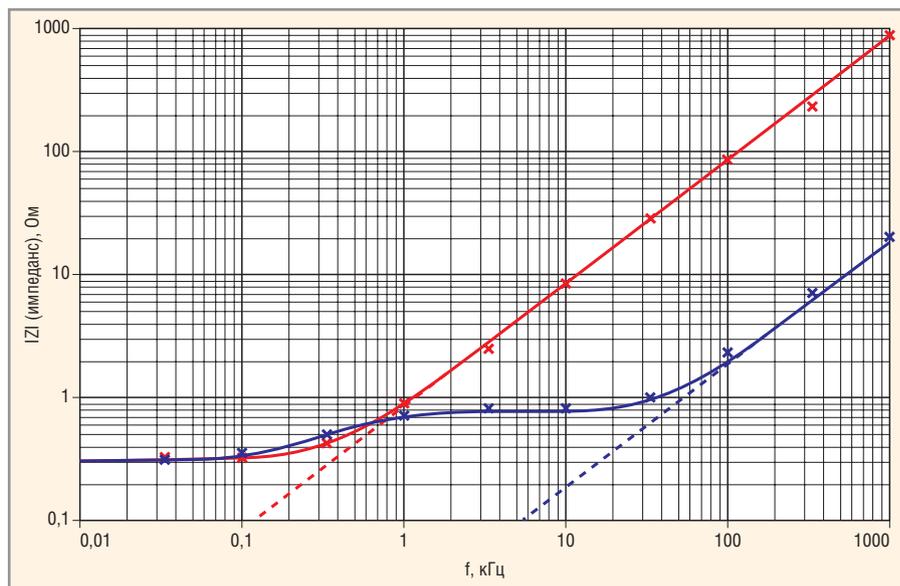


Рис. 3. Импеданс трансформатора – сравнение моделей

Сплошная линия – с учётом сопротивлений, пунктирная – без учёта сопротивлений, красная – разомкнутая вторичная обмотка, синяя – замкнутая вторичная обмотка, x – экспериментальные точки.

частот трансформатора) характеристики моделей, построенных без учёта и с учётом сопротивлений обмоток, практически совпадают. Поэтому при анализе допустимо использовать модель без учёта сопротивлений, что упрощает расчёты. Однако поскольку измерения импеданса с помощью LRC-метра проводятся на низкой частоте, сопротивления обмоток необходимо учитывать в расчёте параметров трансформатора. Частота измерений должна быть достаточно высока, чтобы импеданс при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке заметно отличался. Для случая, показанного на рис. 3, на частоте измерения 1 кГц импеданс заметно отличается, тогда как на частоте 100 Гц импеданс при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке одинаков (слишком низкая частота измерений).

### ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРА С УЧЁТОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОБМОТОК

При учёте омических сопротивлений первичной ( $r_1$ ) и вторичной ( $r_2$ ) обмоток трансформатора получаем следующую систему уравнений, описывающих трансформатор (9):

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{di_1}{dt} L_1 + \frac{di_2}{dt} M + i_1 r_1, \\ u_2 &= \frac{di_2}{dt} L_2 + \frac{di_1}{dt} M + i_2 r_2. \end{aligned} \quad (9)$$

При измерениях импеданса прибор выдаёт результат в виде значений ин-

дуктивности и сопротивления, характеризующих комплексную величину  $Z = j\omega L + r$ , где  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота измерения. В случае разомкнутой вторичной обмотки (при условии  $i_2 = 0$ ) из системы уравнений (9) получим значение импеданса (10), где  $L_a, r_a$  – измеряемые прибором значения индуктивности и сопротивления по первичной стороне при разомкнутой вторичной обмотке. В случае замкнутой обмотки (при условии  $u_2 = 0$ ) получим значение импеданса (11), где  $L_b, r_b$  – измеряемые прибором значения индуктивности и сопротивления по первичной стороне при замкнутой вторичной обмотке.

$$Z_a = j\omega L_1 + r_1 = j\omega L_a + r_a, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Z_b = j\omega \left[ L_1 - \frac{(\omega M)^2 L_2}{(\omega L_2)^2 + r_2^2} \right] + \\ + \left[ r_1 + \frac{(\omega M)^2 r_2}{(\omega L_2)^2 + r_2^2} \right] = j\omega L_b + r_b. \end{aligned} \quad (11)$$

Располагая соотношениями (10), (11), можно выразить коэффициент связи трансформатора (2) через значения измеренных параметров, где  $f$  – частота измерения прибора:

$$K_c = \sqrt{\left(1 - \frac{L_b}{L_a}\right) \left[1 + \frac{(r_b - r_a)^2}{(L_a - L_b)^2 (2\pi f)^2}\right]}. \quad (12)$$

Иногда вместо коэффициента связи удобно пользоваться коэффициентом  $K_p$ , представляющим собой отношение индуктивности рассеяния

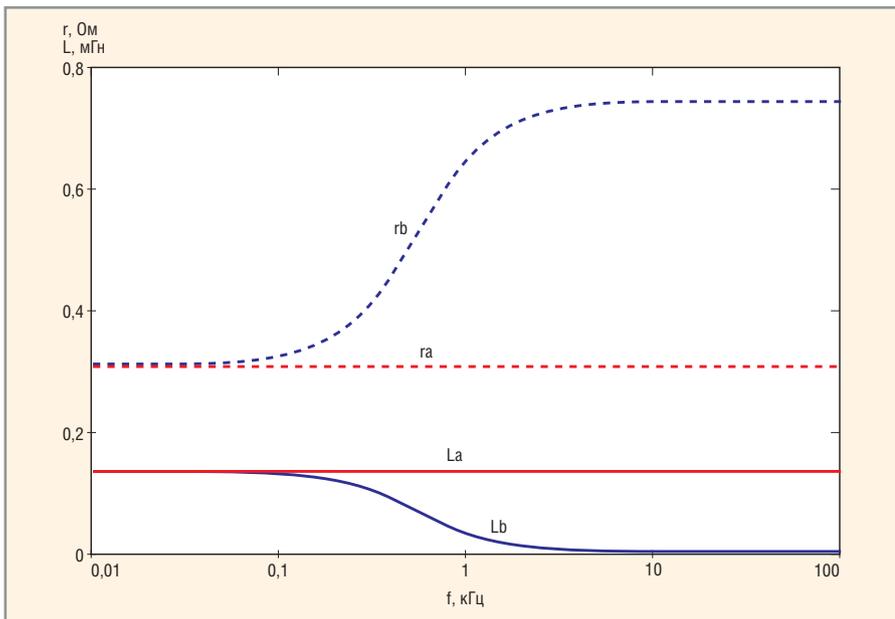


Рис. 4. Частотная зависимость измеряемых величин

$Lp$  к индуктивности намагничивания  $Lm$  трансформатора. Например, в статье [3] исходя из этого отношения определялись потери в снаббере обратного преобразователя. В рассматриваемом случае это отношение можно представить как уравнение (13). В формуле для Т-образной модели трансформатора (рис. 1) индуктивность рассеяния  $Lp$  следует понимать как сумму индуктивностей рассеяния обмоток  $Lp1$  и  $Lp2$ , а для П-образной модели (рис. 2) индуктивность намагничивания  $Lm$  следует понимать как параллельное соединение индуктивностей  $Lm1$  и  $Lm2$ , т.е.  $Lm = 1/(1/Lm1 + 1/Lm2)$ :

$$Kp = \frac{Lp}{Lm} = \frac{(La - Lb)La}{(La - Lb)^2 + \frac{(rb - ra)^2}{(2\pi f)^2}} - 1. \quad (13)$$

Как было отмечено выше, успешное вычисление параметров модели зависит от правильного выбора частоты измерения. На рис. 4 показаны частотные зависимости измеряемых величин  $La$ ,  $ra$ ,  $Lb$ ,  $rb$ . Поскольку в формулах (12) и (13) присутствуют разности этих величин, очевидно, что ниже определённой частоты точность вычислений будет низкой. В данном случае это около 100 Гц.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ Т- И П-ОБРАЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

В предыдущем разделе была показана формула вычисления коэффициента связи (12) трансформатора

по результатам всего двух измерений импеданса – при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке. Также была приведена формула, позволяющая провести некую интегральную оценку соотношения индуктивностей рассеяния и намагничивания в трансформаторе (13). К сожалению, на основании этих измерений невозможно предсказать, как именно распределены индуктивности рассеяния  $Lp1$  и  $Lp2$  в Т-образной модели и индуктивности намагничивания  $Lm1$  и  $Lm2$  в П-образной модели. На практике результаты моделирования при различных вариантах распределения оказываются весьма схожими. Поэтому в первом приближении можно просто задать это распределение при расчётах параметров моделей на основании оценок по опытным данным. Для этого используем параметр  $x1$ , который определим как отношение значения индуктивности рассеяния левого плеча Т-образной модели  $Lp1$  к его возможному максимальному значению  $Lp1max$  (то есть значению при  $Lp2 = 0$ ). Таким образом,  $x1$  будет лежать в диапазоне значений 0...1 (при  $x1 = 0$  получим  $Lp1 = 0, Lp2$  – максимально, при  $x1 = 1$  получим  $Lp2 = 0, Lp1$  – максимально). Тогда взаимоиндуктивность  $M$  и неизвестная индуктивность  $L2$  в системе (1) определяются соответственно через соотношения (14) и (15), где  $L1$  соответствует измеренному значению  $La$  (10),  $Kc$  – вычисляется по формуле (12),  $x1$  задаётся произвольно в диапазоне 0...1 (например, 0,5),  $w1$  и  $w2$  – число

витков обмоток трансформатора (они известны):

$$M = [1 - (1 - Kc^2)x1] L1 \frac{w2}{w1}, \quad (14)$$

$$L2 = [1 - (1 - Kc^2)x1]^2 \frac{L1}{Kc^2} \left(\frac{w2}{w1}\right)^2. \quad (15)$$

Определив значения  $L1, L2$  и  $M$ , можно легко рассчитать параметры Т-образной модели трансформатора по формулам (3) – (5) и П-образной модели – по формулам (6) – (8).

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА**

Экспериментальная проверка данного подхода заключалась в следующем:

1. Измерялись значения величин  $La, ra, Lb, rb$  трансформатора, предназначенного для работы в обратного преобразователя ASA070.10052A [4] с частотой коммутации 100 кГц. Соотношения витков первичной и вторичной обмоток – 61 : 8. Трансформатор намотан на кольцевом сердечнике из магнитоэлектрика (77121-A7 Magnetics). Для измерения импеданса использовался прибор E7-22. Измерения проводились на частоте 1 кГц. Результаты измерений:  $La = 133,9$  мкГн,  $ra = 0,31$  Ом,  $Lb = 31,5$  мкГн,  $rb = 0,65$  Ом;
2. Построены теоретические характеристики импеданса с использованием рассчитанных по измеренным данным параметров трансформатора. Проведено сравнение полученной теоретической кривой с результатом экспериментального измерения импеданса трансформатора в частотной области (рис. 3). Следует отметить, что значение параметра  $x1$ , фигурирующего в (14) и (15), в данном случае крайне слабо влияет на результаты расчёта – получаемые характеристики импеданса при любых значениях  $x1$  в диапазоне 0...1 незначительно отличаются друг от друга.

**Выводы**

Предложена методика определения следующих параметров по результатам измерений импеданса по первичной стороне с помощью стандартного LRC-метра при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке:

- коэффициента связи трансформатора,
- параметров линейного дифференциального уравнения, описывающего трансформатор,

● параметров двух простых схемотехнических моделей трансформатора. Показаны ограничения данного метода, связанные с выбором частоты измерения.

Рассмотренный способ без использования результатов измерений по вторичной стороне хорошо

подходит для измерения параметров трансформаторов, имеющих малое число витков во вторичной обмотке.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Erickson R.W., Maksimovic D.* A multiple-winding magnetics model having directly

measurable parameters. IEEE PESC'98 Record. 1998.

2. [www.ridleyengineering.com/imped.htm](http://www.ridleyengineering.com/imped.htm).  
 3. *Бердников Д.В.* Связь индуктивности рассеяния трансформатора и потерь в снаббере обратногоходового преобразователя. Современная электроника. 2005. № 3.  
 4. [www.continent-tm.ru](http://www.continent-tm.ru). 

**Новости мира News of the World Новости мира**

**Через год – четырёхъядерные чипы Intel следующего поколения**

В III квартале 2007 г. Intel планирует начать поставки четырёхъядерных процессоров второго поколения, известных под кодовым названием Yorkfield. Они придут на смену CPU Core 2 Quad под кодовым названием Kentsfield, – отметили производители материнских плат, хорошо знакомые с производственными планами полупроводникового гиганта.

Согласно планам Intel, продажи семейства Kentsfield начнутся 16 ноября текущего года. В то же время производители материнских плат отмечают, что из-за слабой готовности к выходу этого CPU линейка первого поколения четырёхъядерных процессоров может стать переходной.

По данным источников, Yorkfield будет производиться по технологическому процессу 45 нм, а также работать с семейством наборов системной логики следующего поколения Bearlake, которое поддерживает системную магистраль FSB 1333 МГц и интерфейс PCI Express 2.0. Первые системы на основе Yorkfield, в составе которых появятся чипсеты Bearlake X и память DDR3-1333, будут предназначаться для рынка игровых систем класса high-end.

[www.itware.com.ua](http://www.itware.com.ua)

**В NTT DoCoMo создали трёхмерный дисплей нового типа**

Японская корпорация NTT DoCoMo сообщила о разработке нового жидкокристаллического дисплея, который позволяет просматривать объёмные изображения без использования специальных очков.

В новой системе используется видеокамера и массив чечевицеобразных, но односторонне выпуклых линз. Видеокамера постоянно отслеживает положение пользователя перед экраном, что позволяет изменять характеристики изображения, проецируемого через линзы, в режиме реального времени. По заявлениям компании NTT DoCoMo, углы обзора нового дисплея составляют 60° по горизон-

тали и 30° по вертикали. Допускается вывод как статических трёхмерных изображений, так и видео в режиме 3D.

В работах по созданию нового трёхмерного экрана принимал участие адъюнкт-профессор Ясухиро Такаги из Токийского агропромышленного университета. В перспективе новые дисплеи могут найти применение в интерактивных развлекательных системах, игровых комплексах, сфере рекламы и так далее. Возможности технологии будут демонстрироваться в рамках выставки Ceatec Japan 2006, которая будет проходить в Японии с 3 по 7 октября.

[www.terralab.ru](http://www.terralab.ru)

**LG.Philips LCD разработала ЖК-дисплей толщиной 1,3 мм**

Компания LG.Philips LCD выпустила самый тонкий в мире ЖК-дисплей для мобильных устройств. Его толщина составляет 1,3 мм, что почти на 32% меньше серийных. Разработчикам удалось уменьшить толщину не только самого дисплея, но и модуля подключения. По словам представителей компании, дисплей позволит создавать мобильные телефоны толщиной не более 6,9 мм. Серийные ЖК-дисплеи, используемые в настоящее время в мобильных телефонах, имеют толщину 1,9...2,9 мм, а OLED-дисплеи – 1,5...1,8 мм.

Образец тонкого дисплея продемонстрирован на выставке SID Mobile Displays



2006 в калифорнийском городе Сан-Диего. Сроки начала коммерческого производства дисплея и его ориентировочная стоимость не сообщаются.

[www.terralab.ru](http://www.terralab.ru)

**Sharp создала дисплей, показывающий сразу три изображения**

Японская компания Sharp сообщила о разработке необычного ЖК-дисплея, способного показывать одновременно три изображения. Новинка получила название Triple Directional Viewing LCD. Ранее Sharp уже анонсировала экраны для автомобильных навигационных систем, показывающие две различные картинки под разными углами. На новом дисплее изображения также становятся видны при просмотре с трёх различных направлений. Компания Sharp не вдаётся в технические подробности, отмечая лишь, что принцип работы новинки основан на использовании барьера параллакса.

Экраны, показывающие сразу три изображения, могут найти применение в са-



мых различных областях, например в автомобилях. В этом случае водитель сможет просматривать карту местности, пассажир на переднем сиденье – изучать меню ближайшего ресторана, а пассажиры сзади – наслаждаться фильмом. Кроме того, экраны Triple Directional Viewing LCD должны повысить эффективность рекламы. Их, например, можно будет устанавливать в супермаркетах с целью отображения строго определённых рекламных роликов или объявлений для людей в различных отделах. Кроме того, новые дисплеи могут заинтересовать медиков и военных.

[www.terralab.ru](http://www.terralab.ru)