

ЕМКОСТНОЙ ТРАНСФОРМАТОР

Сенюткин П.А.

Сенюткин Петр Алексеевич – инженер-электрик, пенсионер,
г. Глазов

Аннотация: рассмотрена эквивалентная схема повышающего емкостного трансформатора. Повышение напряжения обеспечивается наличием отрицательной емкости в эквивалентной схеме. Представлено сравнение теоретических и экспериментальных данных на частоте 1 кГц.
Ключевые слова: емкостной трансформатор, отрицательная емкость, повышение напряжения.

Теоретически, на основе электромагнитной индукции могут существовать 3 типа трансформаторов (ТР): индуктивный ТР (L-ТР), индуктивно-емкостной ТР (LC-ТР), емкостной ТР (C-ТР) [1, 27]. Каждый из этих типов имеет по 4 эквивалентных схемы (ЭС), собрав которые можно получить устройство, работающее, практически, как настоящий реальный ТР, за исключением LC-ТР, в ЭС которого имеется отрицательное активное сопротивление [2, 16]. Учитывая гармоническое возбуждение ТР на строго определенной частоте (50/60 Гц, 400 Гц, 1000 Гц и т.д.), отрицательную индуктивность в ЭС L-ТР нужно заменить емкостью, а отрицательную емкость в ЭС C-ТР - индуктивностью. Примеры такой замены подробно описаны в [1, 27]. Наличие отрицательной реактивности в ЭС ТР выявляется при построении ЭС после измерения входных и выходных характеристик ТР [3,37]. Именно наличие отрицательной реактивности в ЭС ТР обеспечивает свойство ТР повышать напряжение. В работе [3, 37] представлено выражение:

$$K_U = K_{CB} \times K_K \quad (1)$$

Где K_U – коэффициент передачи по напряжению, K_{CB} - коэффициент связи K_K – конструктивный коэффициент. Из (1) видно, что значение $K_U > 1$ можно обеспечить и при малом значении K_{CB} (например 0,1) и большом значении K_K (например 11). Это позволяет изготовить L-ТР без всякого сердечника, при необходимости, но может привести к повышенному расходу материалов обмотки, особенно на промышленных частотах 50/60 Гц.

Обозначим входные клеммы ТР 1-1', а выходные 2-2', индексом 12 прямое включение ТР (вход-1-1', выход - 2-2'), а индексом 21 обратное включение ТР (вход-2-2', выход -1-1'). Тогда:

$$K_{U12} \times K_{U21} = K_{CB} \times K_{K12} \times K_{CB} \times K_{K21} \quad (2)$$

Так как K_{CB} не зависит от направления включения а $K_{K12} \times K_{K21} = 1$, то:

$$K_{U12} \times K_{U21} = (K_{CB})^2 \quad (3)$$

Самая ранняя конструкция C-ТР, обнаруженная автором, представлена в авторском свидетельстве 1959 г [4,42]. Описание аналогичного устройства, уже под названием трансформатор Миславского, опубликовано в 1992 г. [5, 59] и позднее, с некоторыми вариациями, в 2004г [6, 65]. Работы [5, 6] посвящены как устройству LC-ТР, так и устройству C-ТР. Теоретическая реализация LC-ТР описана в [7, 61], практическая - в [8, 21]. Несмотря на то, что в работах [4-6] приведены изображения устройства C-ТР, никаких подробных характеристик C-ТР не приводится.

На основании имеющейся у автора элементной базы и аппаратуры для экспериментов была выбрана П-образная ЭС C-ТР с коэффициентом взаимной индукции $E > 0$. Рабочая частота $f_0 = 1$ кГц. В качестве элемента отрицательной емкости использовалась индуктивность. Характеристики индуктивности измерялись RLC мультиметром MS5308 на частоте 1 кГц: $L = 15,4$ мГн, реактивное сопротивление $X_L = j96,8$ Ом эквивалентное последовательное сопротивление $R_{ПЭ} = 8$ Ом. Расчетная, эквивалентная этой индуктивности отрицательная емкость, равна -1,644 мкФ [3, 37]. При переключении MS5308 на принудительное измерение емкости на частоте 1 кГц, при измерении индуктивности 15,4 мГн, индицируется значение 1,646 мкФ. В эксперименте использовались конденсаторы К53-21 и К73-17: $C_{1П} = 7,24$ мкФ, $X_{C1П} = -j22$ Ом, $R_{ПЭ} = 1$ Ом; $C_{2П} = 2,85$ мкФ, $X_{C2П} = -j55,8$ Ом, $R_{ПЭ} = 1$ Ом. Для всех реактивных элементов в схеме на рис 1в., эквивалентное последовательное сопротивление должно быть не более (5-10) % от реактивного.

Обозначение C-ТР показано на рис. 1а. Эквивалентная П-образная схема с $E > 0$, рассчитанная с учетом $C_{3П} = -1,66$ мкФ, представлена на рис. 1б.



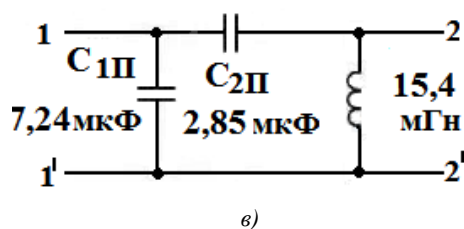


Рис. 1. Емкостной трансформатор

Заменяв отрицательную емкость $C_{3П} = -1,64$ мкФ на индуктивность $L = 15,4$ мГн, получим схему, представленную на рис.1в. Так как рассматривается С-ТР, входные (ВХ) и выходные (ВЫХ) характеристики будут представлять из себя емкости, измеренные в режиме холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). Для схемы на рис.1б, теоретические значения [3, 37]:

$$C_{ВХХХ} = 3,377 \text{ мкФ} \quad (4)$$

$$C_{ВХКЗ} = 10,08 \text{ мкФ} \quad (5)$$

$$C_{ВЫХХХ} = 0,405 \text{ мкФ} \quad (6)$$

$$C_{ВЫХКЗ} = 1,21 \text{ мкФ} \quad (7)$$

Для схемы на рис. 1в значения емкостей, измеренные мультиметром MS5308 на частоте 1 кГц (в режиме автоопределения типа измеряемого элемента) и рассчитанные реактивные сопротивления X :

$$C_{ВХХХ} = 3,96 \text{ мкФ} \quad X_{ВХХХ} = -j40,2 \text{ Ом}, \quad (8)$$

$$C_{ВХКЗ} = 10,08 \text{ мкФ} \quad X_{ВХКЗ} = -j15,8 \text{ Ом}, \quad (9)$$

$$C_{ВЫХХХ} = 0,54 \text{ мкФ} \quad X_{ВЫХХХ} = -j294,7 \text{ Ом} \quad (10)$$

$$C_{ВЫХКЗ} = 1,26 \text{ мкФ} \quad X_{ВЫХКЗ} = -j126,3 \text{ Ом} \quad (11)$$

По данным (8)-(11), $K_{CB} = 0,767$, $K_{K12} = 2,768$, $K_{U12} = 2,17$, $K_{K21} = 0,361$, $K_{U21} = 0,277$ [3,37].

Следует заметить, что величины (8)-(11) полностью описывают режим работы четырехполюсника и именно они позволяют определить, является ли четырехполюсник трансформатором. При исследовании С-ТР использовались: генератор синусоидальных колебаний 0-50 МГц, внутренним сопротивлением 50 Ом и максимальной амплитудой 8,4 В, осциллограф 0-100 МГц с входным сопротивлением 1 МОм, входной емкостью 14 пФ. Измеренные коэффициенты передачи на частоте 1 кГц в режиме холостого хода С-ТР по схеме рис.1в составили: $K_{U12} = 2,0$ (расчетное $K_{U12} = 2,17$), $K_{U21} = 0,28$ (расчетное $K_{U21} = 0,277$). $K_{U12} \times K_{U21} = 0,56$, $(K_{CB})^2 = (0,767)^2 = (0,767)^2 = 0,588$.

Следует заметить, что хотя ЭС рис.1в очень чувствительна к рабочей частоте и номиналам элементов, она не является резонансным трансформатором. Резонансы схемы рис. 1в не лежат на частоте 1 кГц. K_U настоящего С-ТР в режиме холостого хода обладает значительной полосой частот (рис. 1б) и, кроме того, не имеет гальванической связи между входом и выходом.

Список литературы

1. Сенюткин П.А. Об эквивалентных схемах трансформирующих четырехполюсников индуктивно-емкостного характера. Промышленная энергетика, 2011. № 5. Стр. 27-31.
2. Сенюткин П.А. Об эквивалентных схемах различных типов связей, используемых в автоматизированных, роторных установках ультразвукового контроля. Контроль. Диагностика, 2011. № 3. Стр. 12-16.
3. Сенюткин П.А. Использование индуктивной и емкостной связей на различных частотах. Контроль. Диагностика, 2010. № 7. Стр. 37-42.
4. Саханович Г.В. Емкостной трансформатор. Авторское свидетельство № 621894/24. Бюллетень изобретений № 22, 1959. 42 стр.
5. Ильин А. Дуэт Джеймса Клерка Максвелла и ... Володи Миславского. Юный техник, 1992. № 6. Стр. 59-61.
6. Ильин А., Прокопцев Ю. О том, как Володя Миславский помог Джеймсу К. Максвеллу. Юный техник, 2004. № 2. Стр. 65-69.
7. Глаголев А.Е. Ультразвуковые индукционные преобразователи. Теоретический анализ работы пьезопреобразователя. Дефектоскопия, 2009. № 4. Стр. 61-68.
8. Глаголев А.Е. Ультразвуковые индукционные преобразователи. Экспериментальные исследования работы. Дефектоскопия, 2010. № 1. Стр. 21-33.