

Как работает трансформатор...

Ни для кого не секрет, что современная теория трансформатора содержит ряд утверждений, противоречащих законам электротехники и главное закону сохранения энергии. Утверждение о том, что в магнитопроводе (сердечнике) трансформатора, в режиме работы на нагрузку, присутствует только магнитный поток перемагничивания (магнитный поток холостого хода), просто не выдерживает критики. Энергия, затрачиваемая на создание этого потока, значительно меньше энергии, которая снимается со вторичной обмотки трансформатора. Более того, эта энергия носит реактивный характер, т.е. вначале она потребляется из источника питания, а затем, полностью, возвращается обратно. На самом деле всё происходит не так. Магнитопровод, допустим, сварочного трансформатора нагревается значительно сильнее в режиме короткого замыкания (КЗ), чем при холостом ходе. После чего, на холостом ходу, его температура снижается. Хотя непосредственного контакта с обмотками, магнитопровод трансформатора не имеет, да и его обмотки, при длительной работе, за частую, бывают холоднее магнитопровода. Был и такой случай, когда при КЗ, ферритовый магнитопровод трансформатора разлетелся на куски, и довольно громко. Ни чего себе, «компенсировали друг друга» магнитные потоки вторичной и часть потока первичной обмоток. И это реальный факт. Также не убедительно утверждение и о том, что ток короткого замыкания идеального трансформатора стремиться к бесконечности. Это противоречит закону сохранения энергии и больше похоже на фантастику, чем на науку, т.к. не показано за счёт чего передаётся энергия во вторичную обмотку.

Мною была предпринята попытка исправить это несоответствие и, на мой взгляд, она удалась. Результатами своей работы, которая заняла у меня почти три года, я хочу поделиться в этой статье.

В качестве объекта исследования будем использовать модель идеального трансформатора, которая позволит максимально упростить задачу. Напомним свойства такого трансформатора. Пусть это будет кольцевой трансформатор, обмотки которого равномерно распределены по всей длине средней линии (ℓ) магнитопровода, при этом намотаны они одна над другой. Активные сопротивления обмоток равны нулю. Весь магнитный поток, создаваемый обмотками, проходит через магнитопровод, причём индуктивное сопротивление рассеивания и паразитные ёмкости, тоже равны нулю. В магнитопроводе трансформатора отсутствуют всякие потери, а его характеристика намагничивания, т.е. зависимость индукции магнитного потока (B) от напряжённости магнитного потока (H), имеет линейный характер. Т.е. $B = \mu_0 \mu H$ на интервале от $-B_m$ до $+B_m$. Здесь и далее по тексту (μ_0) – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума), (μ) – относительная магнитная проницаемость магнитопровода, а индексом (m) – будет обозначаться амплитудное значение той величины, у которой он применён.

Для облегчения анализа процессов, протекающих в трансформаторе, подключимся к идеальному источнику напряжения прямоугольной формы. На интервале полупериода будем считать, что напряжение постоянно. Работу трансформатора, мы с Вами, будем рассматривать с точки зрения энергии магнитных потоков, протекающих в магнитопроводе трансформатора. Мне кажется, ни у кого не возникнут сомнения в том, что энергия из первичной обмотки трансформатора во вторичную обмотку, передаётся посредством этих магнитных потоков.

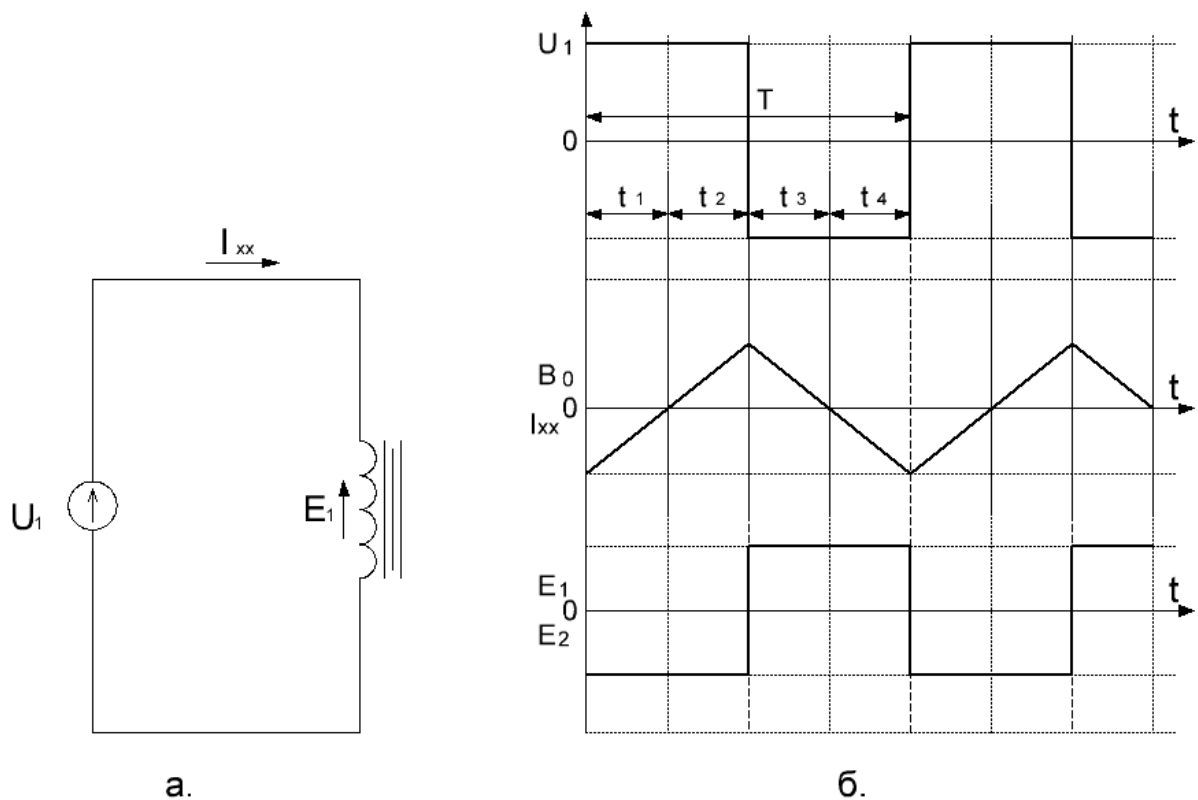


Рис 1.

Рассмотрим цепь первичной обмотки трансформатора, изображённую на рисунке 1а. В установившемся режиме холостого хода, напряжение питания (U_1), индукция магнитного потока (B_0), ток холостого хода (I_{xx}) и ЭДС первичной и вторичной обмоток (E_1, E_2) изменяются так, как показано на диаграмме, изображённой на рисунке 1б. Первичная обмотка (w_1) подключена непосредственно к источнику питания, поэтому ЭДС E_1 всегда будет равна напряжению питания U_1 , и направлена ему навстречу.

Определим амплитудное значение мощности холостого хода (P_{m0}), затрачиваемой на создание магнитного потока холостого хода, как произведение ЭДС первичной обмотки E_1 и амплитудного значения тока холостого хода (I_{xx}), при этом выразим их значения через индукцию магнитного потока. ЭДС выразим как:

$$E_1 = 4fB_{m0}Sw_1 \quad (B) \quad (1)$$

где f – частота напряжения питания (Гц). S – площадь поперечного сечения магнитопровода (m^2). w_1 – число витков первичной обмотки.

Ток холостого хода найдём из напряжённости магнитного потока:

$$H_{m0} = \frac{w_1 I_{mxx}}{\ell}, \text{ учитывая, что } H_{m0} = \frac{B_{m0}}{\mu_0 \mu}, \text{ амплитудное значение тока холостого хода}$$

будет равно:

$$I_{mxx} = \frac{B_{m0} \ell}{\mu_0 \mu w_1}. \quad (A) \quad (2).$$

Здесь I_{mxx} -- амплитудное значение тока холостого хода (А); H_{m0} -- амплитудное значение напряжённости магнитного потока (А/м); B_{m0} -- амплитудное значение индукции магнитного потока холостого хода, или перемагничивания (Тл), остальные величины я уже упоминал выше. Для определения амплитудного значения мощности магнитного потока подставим в формулу вместо тока холостого хода и ЭДС, их значение из формул (1) и (2) и получим следующее выражение:

$$P_{\text{m0}} = \frac{4FB_{\text{m0}}^2 S \ell}{\mu_0 \mu} \quad (\text{ВА}) \quad (3).$$

Чем замечательна эта формула? Прежде всего, тем, что зная данные магнитопровода и величину действующего значения напряжения источника питания, мы можем, не рассчитывая количества витков, определить:

1. Величину тока холостого хода

$$I_{\text{mxx}} = \frac{4FB_{\text{m0}}^2 S \ell}{E_1 \mu_0 \mu} \quad (\text{А}) \quad (4).$$

2. Входное сопротивление трансформатора в режиме холостого хода:

$$X_{\text{Вх}} = \frac{4FB_{\text{m0}}^2 S \ell}{I_{\text{mxx}}^2 \mu_0 \mu} \quad (\text{Ом}), \quad (5).$$

Заменив ток холостого хода его значением из выражения (2), после преобразований получим:

$$X_{\text{Вх}} = 4F \frac{\mu_0 \mu S}{\ell} w^2 \quad (\text{Ом}). \quad (6).$$

Здесь ($4F$) – величина обратная времени, за которое индукция перемагничивания B_0 изменяется от нуля до значения B_{m0} .

($\frac{\mu_0 \mu S}{\ell} w^2 = L_1$) – индуктивность первичной обмотки трансформатора (Гн).

Но и это ещё не всё. Формула (3) поможет нам перейти от расчёта электрической цепи, к расчёту магнитной цепи трансформатора и обратно:

Умножим числитель и знаменатель дроби (3) на площадь поперечного сечения магнитопровода S , и после преобразования получим:

$$P_{\text{m0}} = \frac{4FB_{\text{m0}}^2 S \ell}{\mu_0 \mu} = \frac{4FB_{\text{m0}}^2 S \ell \cdot S}{\mu_0 \mu \cdot S} = 4F(BS)^2 \frac{\ell}{\mu_0 \mu S} = 4F \cdot \Phi_{\text{m0}}^2 R_{\text{М}} \quad (7).$$

Или

$$P_{\text{m0}} = 4F P_{\text{М}} = 4F(I_{\text{М}}^2 \cdot R_{\text{М}}) \quad (8).$$

Здесь Φ_{m0} -- магнитный поток перемагничивания магнитопровода, его же принимают как магнитный ток ($I_{\text{М}}$).

$\frac{\ell}{\mu_0 \mu S} = R_{\text{М}}$ -- магнитное сопротивление магнитопровода.

Т.о. рассчитав по законам Ома и Кирхгофа магнитную цепь, мы можем вернуться к расчёту электрической цепи, используя формулу (7).

В нашем случае расчёта магнитной цепи не потребуется, т.к. обе обмотки трансформатора расположены одна над другой по всей длине магнитопровода.

Формулу (3) также можно использовать и для определения мощности дросселя обратного преобразователя. В этом случае эта формула несколько изменится, из-за изменения времени намагничивания магнитопровода и примет вид:

$$P_{m0} = \frac{2FB_{m0}^2 S \ell}{\mu_0 \mu} \quad (\text{ВА}) \quad (9).$$

Но это к теме данной статьи не относится, поэтому продолжим изучение принципа работы трансформатора.

Итак, мы выяснили, что магнитный поток холостого хода, он же и поток перемагничивания сердечника трансформатора, наводит одинаковую ЭДС в каждом витке, всех обмоток трансформатора. Рассмотрим работу вторичной обмотки трансформатора, при активной нагрузке (R_H), в установившемся режиме. На рисунке 2 изображена схема электрической цепи. В начальный момент периода (T), в замкнутой цепи вторичной обмотки, под действием ЭДС E_2 , начинает увеличиваться ток I_{m2} . Ток будет расти, пока не достигнет рабочего значения $I_{m2} = \frac{E_2}{R_H}$. Достигнув этой величины за время τ , ток будет сохранять постоянное значение до окончания полупериода. Мгновенно принять рабочее значение ток не сможет, т.к. последовательно с нагрузкой, в цепи включена индуктивность вторичной обмотки ΔL_2 . В дальнейшем мы определим её значение.

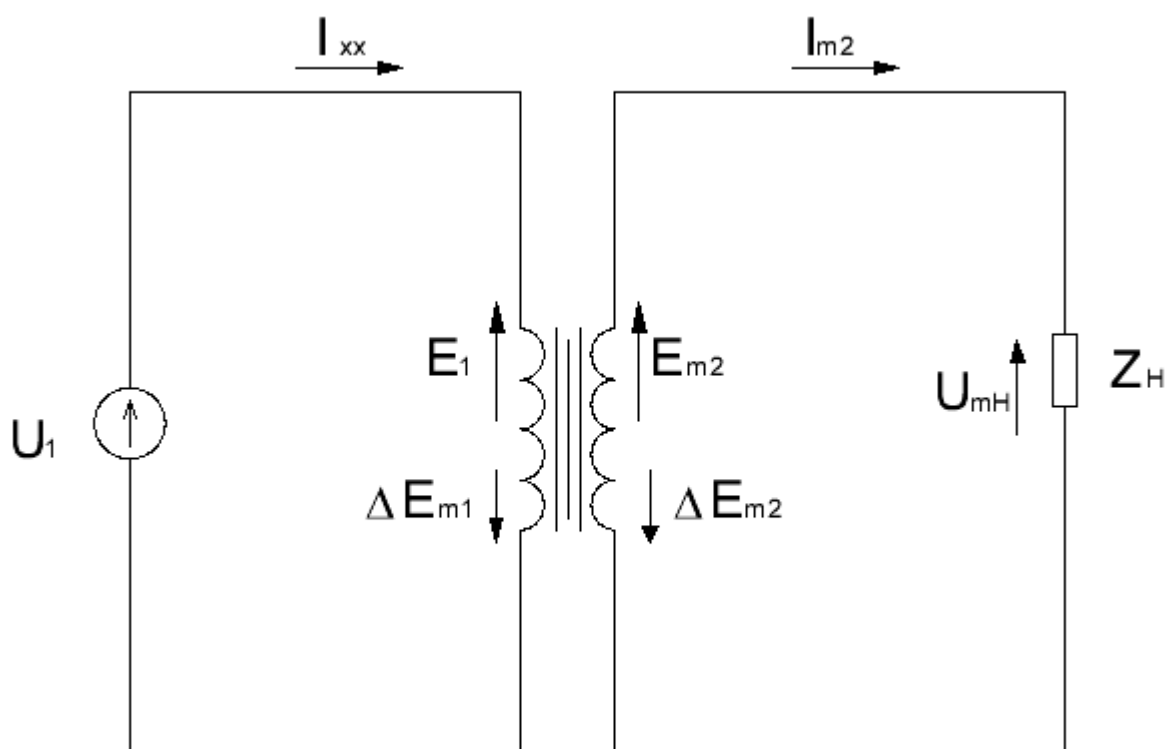


Рис. 2.

Одновременно с током, во вторичной обмотке трансформатора, возникает и увеличивается магнитный поток вторичной обмотки Φ_2 . Своим изменением этот поток наводит ЭДС ΔE_2 во вторичной обмотке и ЭДС ΔE_1 в первичной обмотке

трансформатора. Но т.к. первичная обмотка соединена с источником напряжения, ЭДС ΔE_1 не сможет уменьшить значения ЭДС E_1 . Т.к. ЭДС ΔE_1 направлена в ту же сторону, что и ток, то она вызывает увеличение тока и соответственно магнитного потока в первичной обмотке. Дополнительный магнитный поток первичной обмотки $\Delta\Phi_1$, будет зеркальной копией магнитного потока вторичной обмотки Φ_2 , и направлен ему навстречу. В течении времени τ , будет расти ток и соответствующий ему, магнитный поток Φ_2 во вторичной обмотке, также будет расти и дополнительный поток первичной обмотки $\Delta\Phi_1$. Естественно будет расти и ток в первичной обмотке трансформатора. По истечении времени τ , магнитный поток Φ_2 будет сохранять своё значение до окончания полупериода, при этом ЭДС ΔE_2 , во вторичной обмотке, наводиться уже не будет. Не будет наводиться и ЭДС ΔE_1 в первичной обмотке, но магнитный поток $\Delta\Phi_1$ и, соответственно, добавочный ток ΔI_1 , в первичной обмотке, сохранятся. Пока в магнитопроводе присутствует магнитный поток вторичной обмотки Φ_2 , в нём всегда будет присутствовать его зеркальная копия, дополнительный магнитный поток первичной обмотки $\Delta\Phi_1$. Самостоятельно поток $\Delta\Phi_1$ измениться не сможет. Если, по каким-либо причинам магнитный поток $\Delta\Phi_1$ “захочет” изменить своё значение, в первичной обмотке мгновенно возникнет ЭДС ΔE_1 , но уже за счёт самоиндукции, и возвратит его в исходное состояние.

Следует отметить, что такой процесс, когда ЭДС ΔE_2 наводится не в течение всего периода, характерен, только для трансформатора, питающегося от источника напряжения прямоугольной формы. В этом случае снижение напряжения на нагрузке происходит за счёт явления, очень похожего на регулировку напряжения методом ШИМ (широтно-импульсной модуляции). При питании трансформатора от источника напряжения синусоидальной формы, когда производных по времени может быть, сколь угодно много, ЭДС ΔE_2 будет представлять непрерывную функцию $\Delta E_{m2} \sin(\omega t)$, в течение всего периода, следовательно и напряжение на нагрузке будет уменьшено, относительно ЭДС E_2 , тоже непрерывно в течении всего периода.

Итак, мы выяснили, что в магнитопроводе трансформатора, в режиме работы на нагрузку, находятся два магнитных потока, т.е. магнитный поток первичной обмотки Φ_1 и магнитный поток вторичной обмотки Φ_2 . Магнитный поток первичной обмотки трансформатора представляет собой, сумму двух магнитных потоков: магнитного потока перемагничивания магнитопровода Φ_0 и добавочного магнитного потока $\Delta\Phi_1$.

В этом моя версия несколько расходится с официальной теорией трансформатора, в которой утверждается, что магнитный поток вторичной обмотки Φ_2 , компенсируется (нейтрализуется), дополнительным магнитным потоком первичной обмотки $\Delta\Phi_1$. Но один магнитный поток не может удалить другой, направленный ему на встречу, магнитный поток, в природе такого не бывает. В подтверждение своих слов, я предлагаю очень простой пример. Возьмём два постоянных магнита, и направим их на встречу друг другу одноимёнными полюсами. Из-за взаимодействия встречных магнитных потоков, между магнитами возникнет отталкивающая сила, не заметить которую невозможно. Магнитные потоки, при этом, никак не компенсируют (не уничтожат) друг друга.

Продолжим дальше наш эксперимент. Положим наши магниты на ровную поверхность и начнём приближать один из магнитов к другому. Когда отталкивающая сила превысит силу трения, удерживающую второй магнит на месте, то второй магнит начнёт двигаться

вместе с первым магнитом. Таким образом, энергия, прикладываемая к одному магниту, посредством взаимодействия встречных магнитных потоков, передаётся и другому магниту. Об этом явлении знают даже дети.

Аналогичное явление происходит и в магнитопроводе трансформатора. Благодаря взаимодействию встречных магнитных потоков, происходит передача МДС из первичной обмотки во вторичную обмотку трансформатора. Напомним, МДС – это Магнитодвижущая Сила, которая равна произведению силы тока в обмотке, на число её витков.

Мне кажется, что создатели теории трансформатора пытались идти таким путём, но их поставил в тупик ещё один «фокус» трансформатора, о котором мы узнаем чуть позже.

Итак, мы выяснили, что магнитный поток Φ_2 жёстко связан с величиной тока I_{m2} во вторичной обмотке трансформатора, поэтому, определив параметры этого магнитного потока, мы сможем найти и значение тока.

Геометрические размеры магнитного потока Φ_2 , будут такими же, как и у магнитного потока перемагничивания трансформатора, т.к. эти потоки находятся в одном и том же магнитопроводе. А для определения индукции магнитного потока Φ_2 необходимо найти значение ЭДС ΔE_2 . Для того чтобы определиться с ЭДС ΔE_2 , нужно вторичную обмотку подключить к ЭДС E_2 , тогда ЭДС ΔE_2 будет равна ЭДС E_2 , т.е. включить трансформатор в режим короткого замыкания. Теперь определим индукцию магнитного потока вторичной обмотки:

$$B_{m2} = \frac{E_2}{4FSw_2} = B_{m0} \quad (\text{Тл}) \quad (10).$$

Как видим в режиме короткого замыкания, индукция магнитного потока вторичной обмотки равна индукции магнитного потока перемагничивания магнитопровода, т.е. холостого хода.

Напряжённость магнитного потока вторичной обмотки будет равна:

$$H_{m2} = \frac{B_{m2}}{\mu_0} \quad (\text{А/м}) \quad (11).$$

А в режиме короткого замыкания:

$$H_{m2} = \frac{B_{m0}}{\mu_0} \quad (\text{А/м}) \quad (12).$$

Вот мы и подошли к тому моменту, который, как мне кажется, ставил в тупик создателей теории трансформатора.

Весь «фокус» в том, что в одинаковых встречных магнитных потоках ни какое вещество не намагничивается, в том числе и ферромагнетики. Домены, находящиеся в ферромагнетиках, каждый из магнитных потоков пытается повернуть в свою сторону с одинаковым усилием. Одновременно повернуться в обе стороны, домены не могут, это естественно, поэтому они остаются в произвольном состоянии.

В подтверждение этого явления можно провести следующий эксперимент. Возьмём два электромагнита постоянного тока с ферромагнитными сердечниками. Направим электромагниты на встречу друг другу одноимёнными полюсами. Из-за взаимодействия встречных магнитных потоков, между электромагнитами возникнет отталкивающая сила. Это очень похоже на наш предыдущий эксперимент с постоянными магнитами, но есть очень существенное отличие. Попробуем соединить электромагниты друг с другом. Вначале отталкивающая сила будет возрастать, при приближении электромагнитов друг к другу, но после того, как только их сердечники соединятся, отталкивающая сила резко уменьшится. И если магнитные потоки электромагнитов различные по величине, то

электромагниты после соединения прилипнут друг к другу. Более наглядного примера трудно придумать, но я думаю, что и этого будет достаточно.

Продолжим наш анализ. Теперь мы знаем, что ЭДС E_2 , во вторичной обмотке, возбуждается магнитным потоком Φ_0 и её значение можно найти по формуле:

$$E_2 = 4FB_{m0}Sw_2 \quad (B) \quad (13).$$

Ток во вторичной обмотке поддерживается магнитным потоком Φ_2 и его значение, в режиме короткого замыкания мы тоже можем определить по формуле:

$$I_{m2K3} = \frac{B_{m0}\ell}{\mu_0 w_2} \quad (A) \quad (14).$$

Теперь мы можем найти амплитудное значение полной мощности трансформатора во вторичной обмотке:

$$P_{m2K3} = \frac{4FB_{m0}^2 S \ell}{\mu_0} \quad (BA) \quad (15).$$

Как видим, эта формула очень похожа на формулу (3) и обладает теми же свойствами. Используя её можно найти: ток короткого замыкания.

$$I_{m2K3} = \frac{4FB_{m0}^2 S \ell}{E_2 \mu_0} \quad (A). \quad (16).$$

Выходное сопротивление.

$$X_{\text{Вых}} = 4F \frac{\mu_0 S}{\ell} w_2^2 \quad (\text{Ом}). \quad (17).$$

(Здесь $(\frac{\mu_0 S}{\ell} w_2^2 = \Delta L_2)$ – индуктивность вторичной обмотки, для тока нагрузки, о которой упоминалось выше).

Возможность перехода к расчёту магнитной цепи, для потоков Φ_2 и $\Delta\Phi_1$.

Нужно отметить один момент. Расчёт магнитной цепи, для реальных кольцевых, или тороидальных трансформаторов, в этом случае, производить необходимо. Т.к. площадь охватываемая витком вторичной обмотки трансформатора, больше, чем площадь поперечного сечения его магнитопровода, в связи с чем, индукция магнитного потока Φ_2 , будет несколько меньше индукции магнитного потока перематгничивания магнитопровода Φ_0 , в режиме короткого замыкания.

И самое главное, теперь зная характеристики магнитопровода и источника питания, мы можем построить нагрузочную характеристику будущего трансформатора! Эта характеристика поможет нам получить напряжение непосредственно на нагрузке, при любом её значении:

$$U_H = E_2 - \Delta E_2 = E_2 - \frac{E_2^2 \mu_0}{4FB_{m0}^2 S \ell} I_{m2} \quad (B). \quad (18).$$

Падение ЭДС на вторичной обмотке находим как:

$$\Delta E_2 = \frac{E_2^2 \mu_0}{4FB_{m0}^2 S \ell} I_{m2} = \frac{E_2 B_{m2}}{B_{m0}} \quad (B). \quad (19).$$

Это выражение можно значительно упростить, если ток нагрузки выразить через индукцию магнитного потока Φ_2 , а получившиеся при этом витки вторичной обмотки выразить через ЭДС E_2 .

$$U_H = E_2 - \frac{E_2 B_{m2}}{B_{m0}} \quad (\text{В}). \quad (20).$$

Зная напряжение на нагрузке, мы легко найдём амплитудное значение мощности нагрузки:

$$P_{mH} = (E_2 - \Delta E_2) I_{m2} \quad (\text{Вт}). \quad (21).$$

Или в параметрах магнитопровода:

$$P_{mH} = \frac{4F(B_{m0} - B_{m2})B_{m2}S\ell}{\mu_0} \quad (\text{Вт}). \quad (22).$$

Разумеется, что подобным образом можно найти и амплитудное значение мощности на вторичной обмотке трансформатора (габаритную мощность):

$$P_{m\Gamma} = E_{m2} I_{m2} \quad \text{или,} \\ P_{m\Gamma} = \frac{4FB_{m0}B_{m2}S\ell}{\mu_0} \quad (\text{ВА}). \quad (23).$$

Кстати, теперешняя теория трансформатора позволяет нам найти, только, эту формулу. Например, выразим в формуле (23) амплитудное значение индукции вторичной обмотки B_{m2} , через максимальную плотность тока в этой обмотке.

$$B_{m2} = \frac{J_2 S_{\text{ок}} k_M \mu_0}{\ell} \quad (\text{Тл}). \quad (24).$$

Здесь (J_2) – плотность тока во вторичной обмотке трансформатора; ($S_{\text{ок}}$) – площадь окна магнитопровода; (k_M) – коэффициент заполнения окна магнитопровода, медью вторичной обмотки (как правило, он не превышает 0,1).

Подставим значение индукции из выражения (24), в формулу (23), и после преобразований, получим:

$$P_{m\Gamma} = 4FB_{m0} J_2 k_M S S_{\text{ок}} \quad (\text{ВА}). \quad (25).$$

Как видим мы получили ту, единственную формулу, которую нам может предложить действующая, пока, теория трансформатора.

Как видим, эта теория раскрывает нам значительно больше свойств трансформатора, нежели предыдущая. Например, можно найти $\text{Cos } \varphi$ трансформатора как:

$$\text{Cos } \varphi = \frac{P_{mH}}{P_{m0} + P_{m\Gamma}}. \quad (26).$$

Подставив значения мощностей из формул (22), (3) и (23), получим следующее выражение для коэффициента мощности:

$$\text{Cos } \varphi = \mu \frac{B_{m2}(B_{m0} - B_{m2})}{B_{m0}^2 + B_{m0}B_{m2}} \quad (27).$$

Продолжим далее. В общем случае существует два типа трансформаторов. Это трансформатор напряжения и трансформатор тока. Трансформатор напряжения удовлетворяет следующим условиям:

$$U(t)_{\text{вх}} = \text{const}; E(t)_{\text{вых}} = \text{const}; I(t)_{\text{вых}} = \text{var}, \text{ зависит от нагрузки.}$$

А трансформатор тока удовлетворяет таким условиям:

$$I(t)_{\text{вх}} = \text{const}; I(t)_{\text{вых}} = \text{const}; U(t)_{\text{вых}} = \text{var}, \text{ зависит от нагрузки.}$$

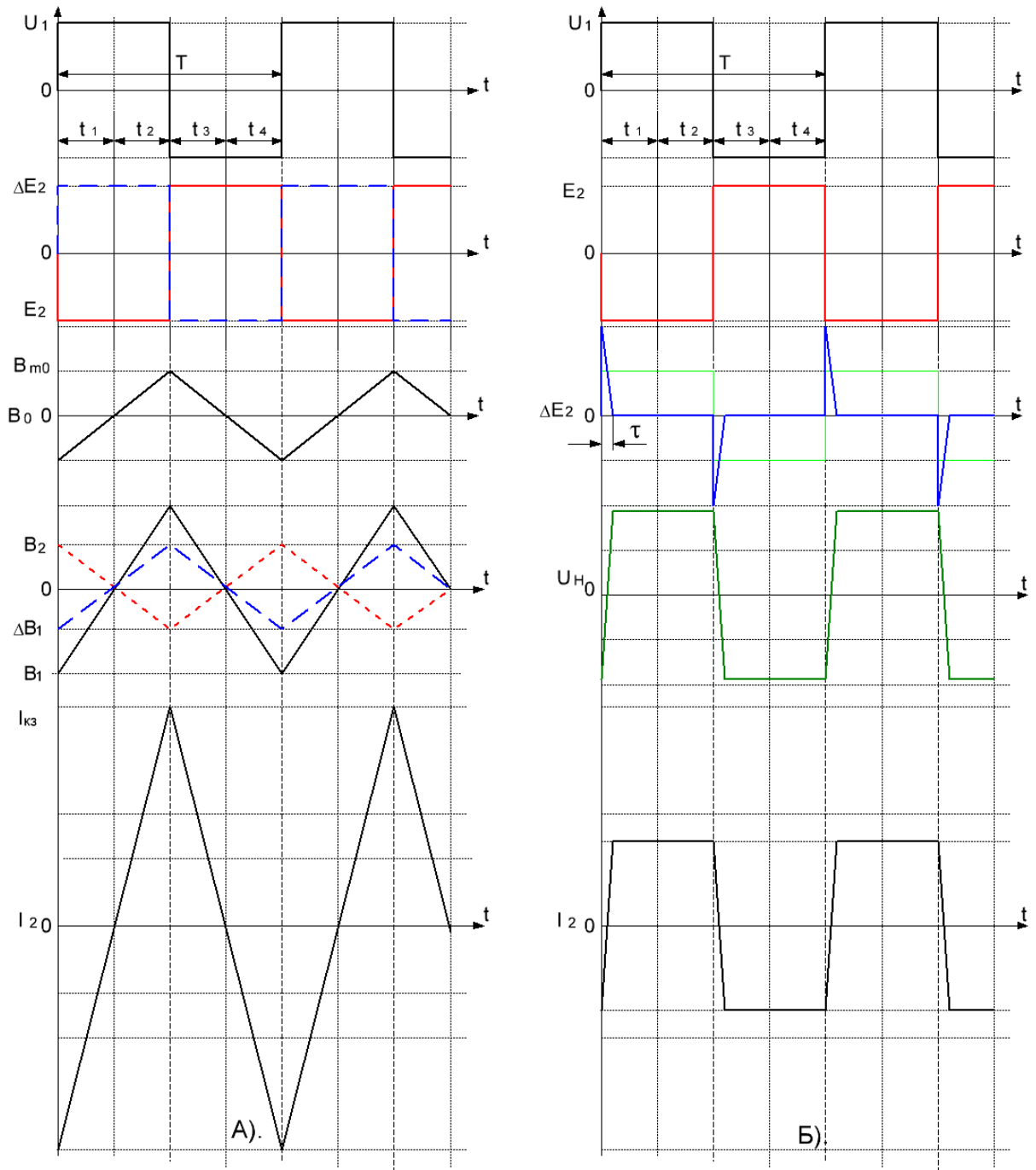


Рис.3.

Теперь, внимательно проанализируем диаграммы работы трансформатора в режиме короткого замыкания, изображённые на рисунке 3А, и диаграммы работы трансформатора на нагрузку, изображённые на рисунке 3Б. сравним входные и выходные параметры токов и напряжений. Не сложно увидеть, что в режиме короткого замыкания, трансформатор копирует во вторичной обмотке, входной ток первичной обмотки. А в режиме холостого хода на вторичной обмотке имеется точная копия входного напряжения. Следовательно, трансформатором напряжения будет трансформатор, работающий в режиме близком к холостому ходу, а трансформатором тока, будет трансформатор, работающий в режиме близком к короткому замыканию. Отсюда можно сделать вывод, что один и тот же трансформатор, в зависимости от режима работы, может быть и трансформатором напряжения, и трансформатором тока.

Анализ теории трансформатора будет неполным, если мы не коснёмся его схемы замещения. На рисунке 4а изображена схема замещения идеального трансформатора, соответствующего действующей теории трансформатора.

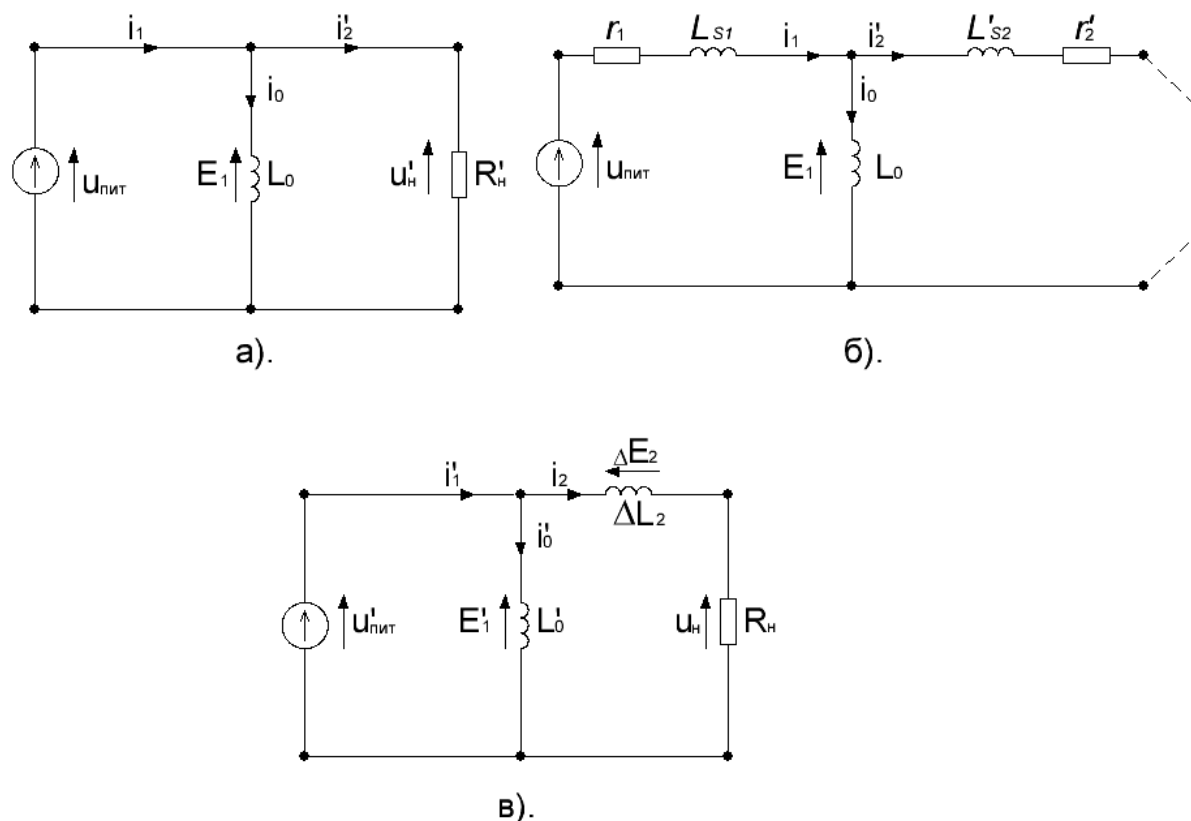
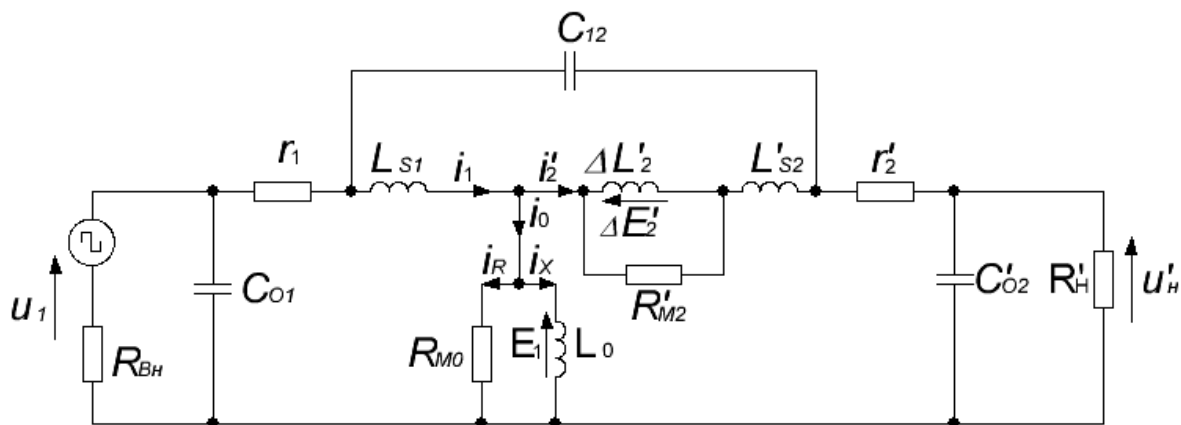


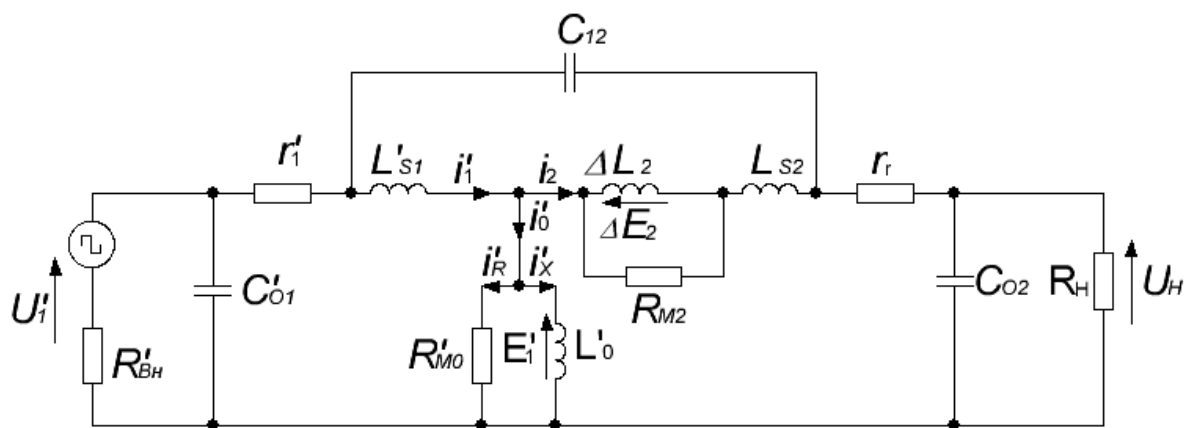
Рис.4.

При её анализе возникает неопределённость с режимом короткого замыкания. С одной стороны, при КЗ (коротком замыкании) в нагрузке ток стремиться к бесконечности, но с другой стороны, этот трансформатор в режиме КЗ работать не должен, т.к. на обмотке перемагничивания будет нулевое напряжение, а без перемагничивания трансформатор не работает. На рисунке 4б изображена упрощённая схема замещения реального трансформатора действующая сейчас. В режиме КЗ сопротивления потерь (r_1 ; L_{s1} ; L'_{s2} ; r'_2) представляют из себя делитель напряжения на два. Отсюда следует, что магнитный поток перемагничивания тоже уменьшается в два раза и ЭДС уменьшается в два раза. Но в реальном трансформаторе этого явления не наблюдается. К примеру, возьмём промышленный сварочный трансформатор ТС300. Намотаем поверх его первичной обмотки несколько витков изолированного провода. Измерим напряжение в этой обмотке при работе сварочного трансформатора на холостом ходу. За тем измерим в ней напряжение в режиме короткого замыкания, замкнём сварочные концы друг с другом. Разумеется, напряжение при коротком замыкании будет несколько ниже, чем при холостом ходе, но, ни как, ни в два раза, а значительно меньше.

На основании тех доводов, которые были приведены в данной статье, предлагаю схему замещения идеального трансформатора, изображённую на рисунке 4в. В ней добавлена дополнительная индуктивность ΔL_2 , которая всё ставит на свои места. Также предлагается приводить параметры первичной цепи трансформатора, ко вторичной обмотке. Такое приведение позволит получить выходные характеристики трансформатора. Для анализа входных характеристик трансформатора, приведение нужно производить, как и прежде, к первичной обмотке трансформатора.



А. Эквивалентная схема замещения трансформатора, приведённая к первичной обмотке.



Б. Эквивалентная схема замещения трансформатора, приведённая ко вторичной обмотке.

Рис. 5.

На рисунке 5 изображены оба варианта схемы замещения реального трансформатора.

Материал, изложенный в данной статье, приводит к двум основным выводам:

1. Мощность трансформатора зависит, прежде всего, от размеров магнитопровода и режима его перемагничивания. Под режимом перемагничивания подразумевается максимальное значение индукции и частоты перемагничивания.
2. Использование верной теории трансформатора, даёт возможность аналитическими методами определять свойства трансформаторов, даже такие, которые нам пока неизвестны. Существующая теория трансформатора нуждается в серьёзной переработке и дополнении.

Анализ трансформатора будет не полным, если мы оставим без рассмотрения магнитную цепь трансформатора. Но этим вопросом займёмся в следующей статье.

P.S. В формулах, используемых в данной статье, применялась Международная Система Единиц (СИ). В статье использовались действующие значения напряжений и ЭДС.

С уважением, Крюков Евгений Николаевич.
г. Томск. 2010г.

Литература:

1. Ю.Н. Стародубцев, «Теория и расчёт трансформаторов малой мощности». РадиоСофт Москва, 2005.
2. Справочник «Источники питания радиоэлектронной аппаратуры» под ред. Г.С. Найвельта. Москва «Радио и связь», 1985.
3. Б.Ю. Семенов, «Силовая электроника от простого к сложному» СОЛОН—ПРЕСС Москва, 2006.
4. Марти Браун, «Источники питания. Расчет и конструирование». «МК – Пресс» Киев, 2005.
5. И.И. Иванов, В.С. Равдоник, «Электротехника» «Высшая школа» Москва, 1984.
6. И.И. Белопольский, А.Г. Пикалова, «Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности». ГосЭнергоИздат, Москва – Ленинград, 1963.
7. С.Н. Кризе, «Расчет маломощных силовых трансформаторов и дросселей фильтров». ГосЭнергоИздат, Москва – Ленинград, 1950.