

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

3.1. Включение силового трансформатора на холостой ход

В нормальном режиме намагничивающий ток силового трансформатора не превышает нескольких процентов от номинального. При включении трансформатора на холостой ход (ХХ) или при восстановлении напряжения после отключения внешнего короткого замыкания (КЗ) в обмотке, присоединённой к питающей сети, ток переходного режима может в 3 - 10 раз превышать номинальный ток. Это явление называется броском намагничивающего тока (БНТ).

БНТ возникает, когда полярность и величина остаточного потока в магнитопроводе не соответствуют полярности и величине вынужденного магнитного потока, определяемого напряжением сети в момент включения. Наибольшее значение БНТ имеет при включении трансформатора в момент перехода кривой напряжения через нулевое значение.

Режим БНТ необходимо учитывать при разработке и выборе параметров срабатывания устройств релейной защиты (РЗ) трансформаторов.

3.1.1. Ток включения однофазного трансформатора. Расчётная схема показана на рис. 3.1. Сеть представлена эквивалентными сопротивлениями и ЭДС. Эквивалентная ЭДС равна напряжению U перед включением, которое в общем случае может отличаться от номинального.

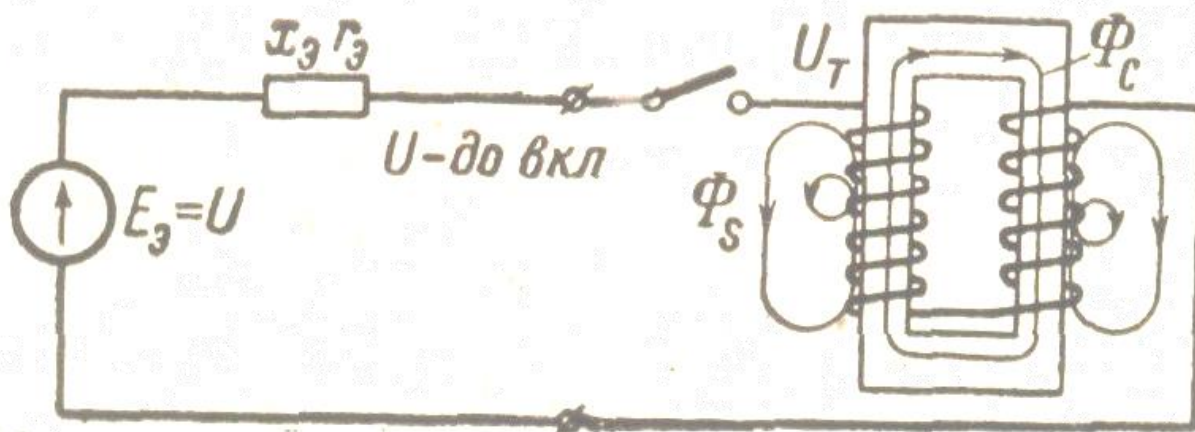


Рисунок 3.1

Уравнение переходного процесса при включении трансформатора на ХХ имеет вид

$$\frac{d\Psi}{dt} + R_s i = U_m \sin(\omega t + \alpha), \quad (3.1)$$

где α - начальная фаза напряжения при включении.

Интегрирование уравнения (3.1) даёт формулу для полного потокосцепления

$$\begin{aligned}\Psi &= \frac{U_m}{\omega} (\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)) + \Psi_r - R_{\sigma} \int_0^t i dt = \\ &= \Psi_m (\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)) + \Psi_r - R_{\sigma} \int_0^t i dt,\end{aligned}\quad (3.2)$$

где $\Psi_m = \frac{U_m}{\omega}$ – амплитудное значение потокосцепления,

$\Psi_r = wSB_r$ – потокосцепление, соответствующее остаточной индукции B_r в момент включения (w – число витков обмотки трансформатора, S – сечение магнитопровода).

Полное потокосцепление сети и обмотки трансформатора

$$\Psi = \Psi_{\sigma} + \Psi_{\sigma} + \Psi_c(i) = (L_{\sigma} + L_{\sigma})i + \Psi_c(i),$$

где Ψ_{σ} – эквивалентное потокосцепление сети; Ψ_{σ} – потокосцепление рассеяния катушки; потокосцепление, $\Psi_c(i)$ – обусловленное потоком в стержне сердечника; L_{σ}, L_{σ} – индуктивности сети и рассеяния катушки соответственно.

Индуктивность рассеяния при включении трансформатора

$$L_{\sigma} = \frac{\mu_0 w^2 (S_{cp} - S)}{l_k},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, w – число витков катушки, S_{cp} – среднее сечение катушки, S – сечение стержня, l_k – средняя длина силовой магнитной линии.

При расчёте БНТ зависимость $\Psi_c(i)$ рекомендуется аппроксимировать спрямлённой характеристикой намагничивания с вертикальным участком $+\Psi_s - \Psi_s$ (рис.3.2).

Определим ток включения трансформатора графически, пренебрегая его активным сопротивлением и полагая $\alpha = 0$. При этом выражение (3.2) приобретает вид

$$\Psi = \Psi_m (1 - \cos \omega t).$$

Построим эквивалентную вебер-амперную характеристику, учитывая потокосцепления сети, рассеяния катушки и в стержне сердечника и изменения потока во времени, задаваемые выражением (3.3) (рис.3.2.). Мгновенные значения БНТ определяются по эквивалентной характеристике $\Psi(i)$ для соответствующих значений Ψ . При принятой идеализации кривой намагничивания БНТ представляет собой полуволну косинусоиды с амплитудой I_m , смещённую относительно оси времени на величину A :

$$i = I_m \cos \omega t + A, \quad i \geq 0. \quad (3.3)$$

При этом $A = \frac{I_{см}}{I_m} = \frac{\Psi_{см}}{\Psi_m} = \frac{\Psi_r - \Psi_m - \Psi_s}{\Psi_m} = 1 - \frac{\Psi_s - \Psi_r}{\Psi_m}$ - величина смещения оси косинусоиды (из рис.3.2), $I_m = \frac{\Psi_m}{L_s + L_\sigma} = \frac{E_m}{\omega(L_s + L_\sigma)} = \frac{E_m}{X_s + X_\sigma}$, где X_σ - сопротивление обмотки в воздухе (при вынутом магнитопроводе).

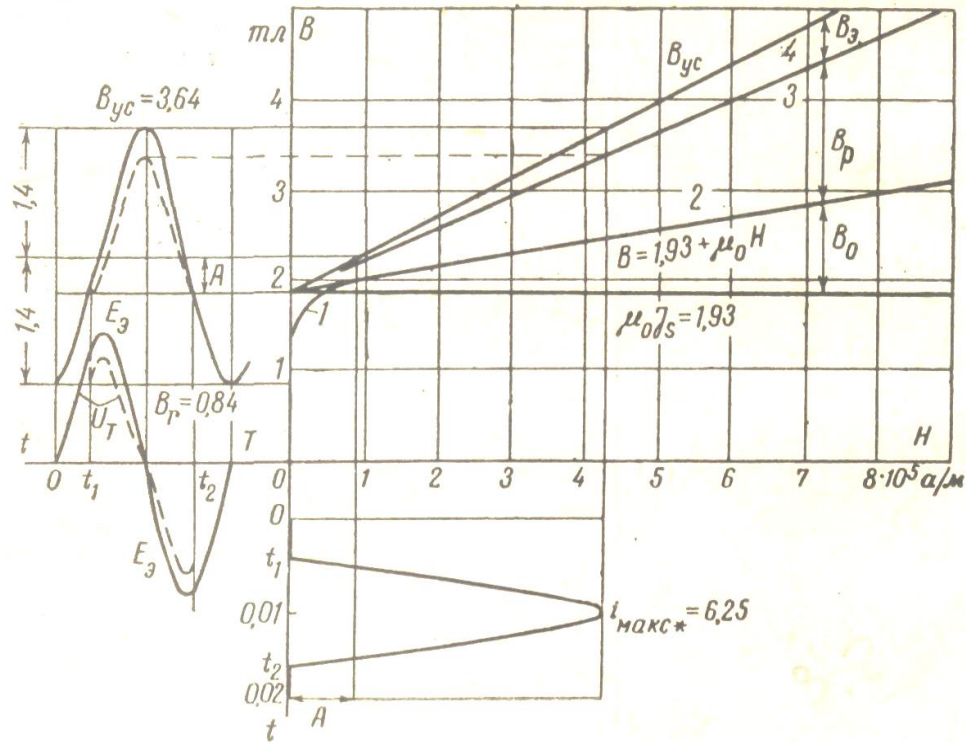


Рисунок 3.2

Величина X_σ определяется по геометрическим размерам катушек:

$$X_\sigma = X_\sigma + X_{нас.с},$$

где $X_{нас.с} = \omega L_{нас.с}$ - индуктивное сопротивление катушки, определяемое по дифференциальной индуктивности катушки ($L_{нас.с} = d\Psi_c / dt$), которая соответствует только потоку в сердечнике (без рассеяния) при полном насыщении.

Приближённо $X_{нас.с}$ может быть определено по формуле

$$X_{нас.с} = \frac{U_n}{\mu_0 I_{хол}},$$

где $I_{хол}$ - действующее значение тока холостого хода; μ_0 - магнитная проницаемость стали, приближённо определяемая по основной кривой намагничивания, снятой на постоянном токе.

Обозначим через t_1 момент времени, когда магнитопровод входит в насыщение, что соответствует началу кривой БНТ (рис.3.2). Учитывая, что косинусоида является чётной функцией из (3.3)

$$A = \cos(\omega t_1 + \alpha).$$

Момент выхода магнитопровода из насыщения обозначим через t_2 , что соответствует времени окончания броска, т.е.

$$A = \cos(\omega t_2 + \alpha),$$

поэтому

$$\cos(\omega t_1 + \alpha) = \cos(\omega t_2 + \alpha) \text{ и } \omega t_2 + \alpha = 2\pi - \omega t_1 - \alpha.$$

Ток броска протекает в пределах угла от ωt_1 до $\omega t_2 = 2\pi - \omega t_1 - 2\alpha$. В остальную часть периода ток равен нулю. Время протекания тока соответствует основанию броска

$$D = \omega t_2 - \omega t_1 = 2\pi - 2(\omega t_1 + \alpha) = 2\pi - 2 \arccos A.$$

Основание броска тока составляет 180 – 240 эл. град.

Максимальное значение тока броска при $\alpha = 0$

$$i_{бр. макс} = I_m + I_{см} = \frac{E_m}{X_1 + X_e} (1 + A).$$

3.1.2. Токи включения трёхфазных и групп однофазных трансформаторов.

В отличие от БНТ при включении однофазных трансформаторов на ХХ, рассмотренных в п.3.1.1, БНТ при включении трёхфазных трансформаторов значительно многообразнее. Это связано с тем, что включение может производиться со стороны обмотки, соединённой как в "треугольник", так и в "звезду". Кроме того, обмотка, соединённая в "звезду" может быть как с заземлённой нейтралью, так и с разземлённой.

Расчёт БНТ производится путём решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в электрических и магнитных цепях. Эта система уравнений имеет большое число возможных соотношений между коэффициентами.

Для упрощения анализа рекомендуется использовать искусственно вводимый коэффициент b , определяющий величину и форму тока в каждой фазе в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} i_A &= i_{\mu A} + i_{\Delta}; \\ i_B &= i_{\mu B} + i_{\Delta}; \\ i_C &= i_{\mu C} + i_{\Delta}; \\ i_{\Delta} &= -b(i_{\mu A} + i_{\mu B} + i_{\mu C}). \end{aligned}$$

Намагничивающие токи: $i_{\mu A}, i_{\mu B}, i_{\mu C}$ рассчитываются также, как и токи однофазного БНТ. Таким образом, однофазные БНТ являются исходными для расчётов трёхфазных БНТ.

Установлено, что для анализа поведения релейной защиты трансформатора достаточно использовать два расчётных типа трёхфазного БНТ.

При токе I типа (рис.3.3) намагничивающий ток одной из фаз (особая фаза A) равен нулю, намагничивающие токи двух других фаз равны по величине и противоположны по знаку.

В особой фазе A протекает периодический бросок тока:

$$i_A = i_{\Delta} = \frac{1}{3}(i_{\mu B} + i_{\mu C})$$

Токи в фазах B и C равны:

$$i_B = i_{\mu B} - i_{\Delta}, \quad i_C = i_{\mu C} + i_{\Delta}.$$

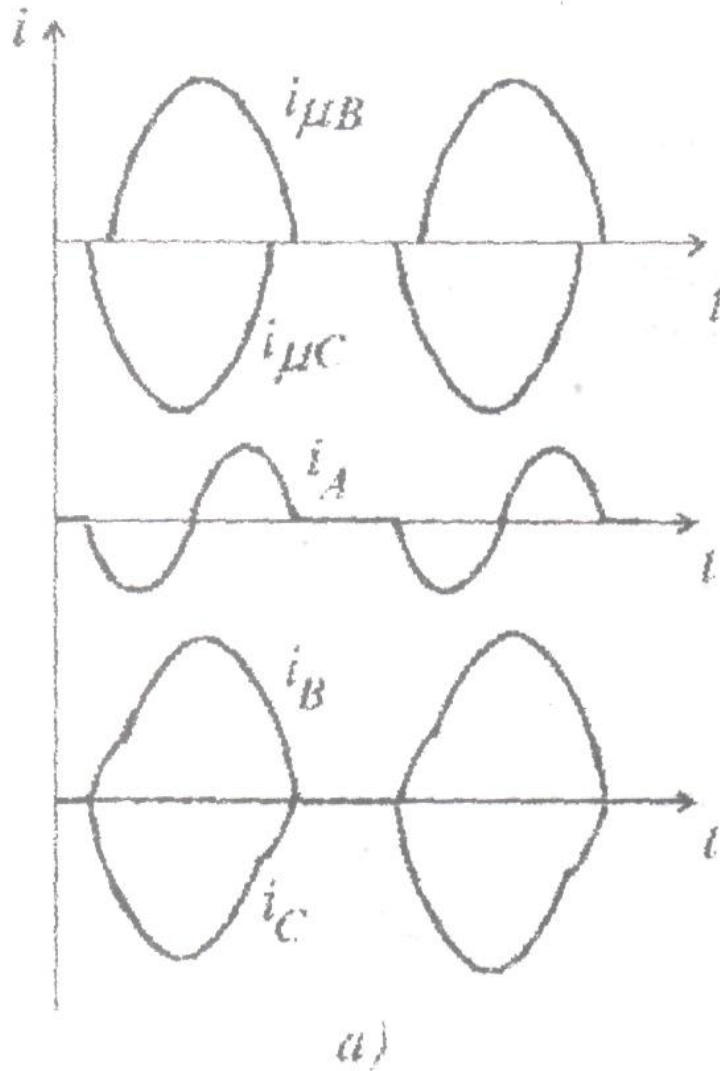


Рисунок 3.3

При токе II типа намагничивающий ток особой фазы A максимальный, токи двух других фаз равны по величине и противоположны по знаку особой фазы:

$$i_A = i_{\mu A} - i_{\Delta};$$

$$i_B = i_{\mu B} - i_{\Delta};$$

$$i_C = i_{\mu C} - i_{\Delta};$$

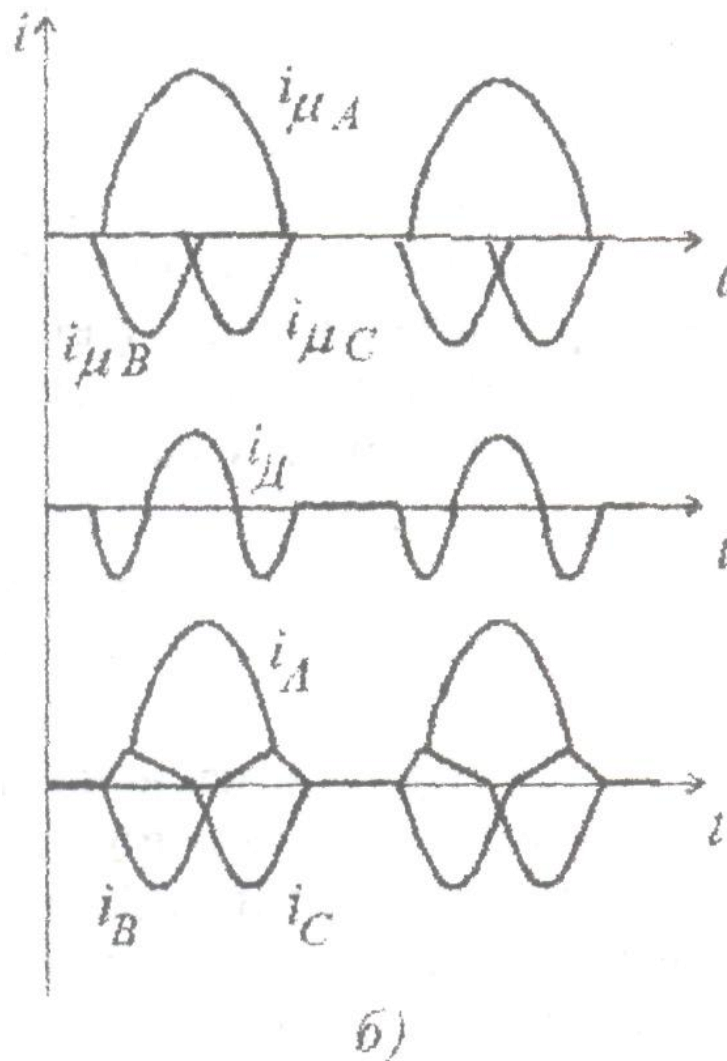


Рисунок 3.4

Гармонический анализ БНТ показывает, что в апериодическом броске кроме основной гармоники содержатся постоянная составляющая и чётные гармоники, в периодическом - только чётные.

3.2. Анализ режимов работы измерительных трансформаторов

3.2.1. Трансформаторы тока и их математические модели. Трансформатором тока (ТТ) называется трансформатор, первичная обмотка которого включена в цепь последовательно; нагрузкой вторичной обмотки является небольшое сопротивление, в котором протекает ток, пропорциональный первичному. ТТ со стальными замкнутыми сердечниками в настоящее время являются основными датчиками тока в энергосистемах для целей релейной защиты и измерений.

Число витков ТТ определяется по внутренним частям обмотки, которые охватываются сердечником.

Входное сопротивление ТТ мало по сравнению с сопротивлением системы, поэтому схема замещения ТТ для низких частот представляется Г-образной

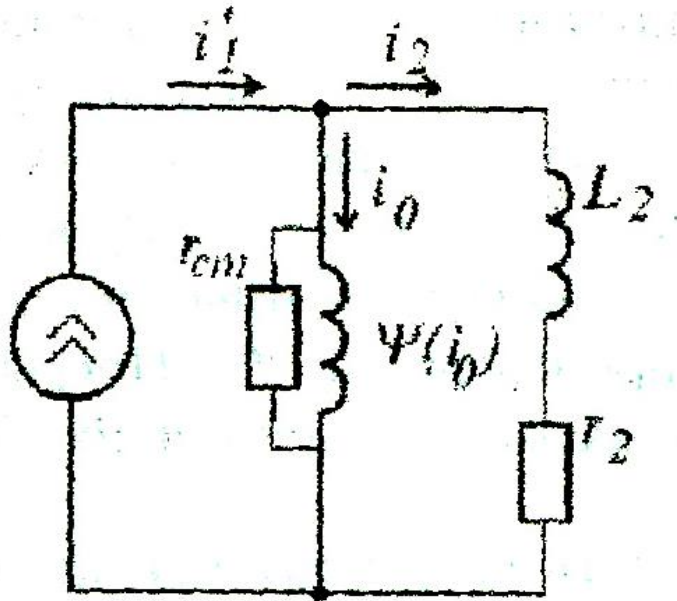


Рисунок 3.5

Параметры вторичной обмотки $L_{обм}$, $R_{обм}$ объединены с параметрами нагрузки $L_{нз}$, $R_{нз}$ и называются параметрами вторичной цепи:

$$L_2 = L_{обм} + L_{нз}, \quad R_2 = R_{обм} + R_{нз}.$$

Параметры схемы замещения и токи приводятся к виткам вторичной обмотки. Сопротивление $R_{см}$ пропорционально потерям в стали на гистерезис, вихревые токи и магнитную вязкость.

При активно-индуктивной нагрузке и $R_{см} = 0$ процессы ТТ описываются системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi}{dt} &= R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}, \\ i_1 &= i_2 + i_0, \\ \Psi &= \Psi(i_0), \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

где $\Psi = w_2 \Phi$ - основное потокосцепление вторичной обмотки;

$i_1, i_0 = Hl / w_2$ - токи первичный и намагничивания, приведенные к виткам вторичной обмотки (l - длина средней линии магнитопровода); i_2 - вторичный ток; $\Psi = \Psi(i_0)$ - характеристика намагничивания ТТ.

3.2.2. Стационарный режим работы ТТ при синусоидальном первичном токе. При протекании по первичной обмотке переменного тока i_1 в магнитопроводе создается магнитный поток Φ_1 , который наводит ЭДС во вторичной обмотке. Если вторичная обмотка замкнута на некоторую

нагрузку, то в ней будет протекать ток. Этот ток согласно закону Ленца имеет направление, противоположное направлению первичного тока i_1 . Вторичный ток создаёт в магнитопроводе магнитный поток Φ_2 , который направлен встречно потоку Φ_1 . В результате геометрического сложения потоков Φ_1 и Φ_2 в магнитопроводе устанавливается результирующий магнитный поток $\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2$, составляющий несколько процентов от Φ_1 . Посредством потока Φ_0 и осуществляется передача энергии из первичной обмотки во вторичную.

При протекании токов в обмотках создаются магнитодвижущие силы (МДС):

- в первичной обмотке $F_1 = I_1 w_1$,
- во вторичной обмотке $F_2 = I_2 w_2$.

При отсутствии потерь энергии в ТТ МДС F_1 и F_2 численно равны, но направлены в противоположные стороны. Такой ТТ называется идеальным.

Для идеального ТТ справедливо равенство

$$\dot{F}_1 = -\dot{F}_2 \quad (3.5)$$

или

$$I_1 w_1 = I_2 w_2. \quad (3.6)$$

Из равенства (3.6) следует, что $k_I = I_1 / I_2 = w_2 / w_1$

$$k_I = I_1 / I_2 = w_2 / w_1, \quad (3.7)$$

где k_I - коэффициент трансформации идеального трансформатора тока.

На основе равенства (3.7) можно записать

$$I_2 = I_1 / k_I. \quad (3.8)$$

В реальных ТТ преобразование тока сопровождается потерями энергии, расходуемой на создание магнитного потока в магнитопроводе, на нагрев и перемагничивание магнитопровода, а также на нагрев проводов обмоток. Поэтому в реальных ТТ первичная МДС должна обеспечить создание необходимой вторичной МДС, а также дополнительной МДС, расходуемой на намагничивание магнитопровода и покрытие других потерь энергии.

Следовательно, для реального ТТ уравнение (3.5) имеет вид

$$\dot{F}_1 = -(\dot{F}_2 + \dot{F}_0),$$

где F_0 - полная МДС намагничивания, затрачиваемая на проведение магнитного потока Φ_0 по магнитопроводу, на перемагничивание и нагрев его. В соответствии с этим, равенство (3.6) примет вид

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 + I_0 w_1, \quad (3.9)$$

где i_0 - ток намагничивания, создающий в магнитопроводе магнитный поток Φ_0 . Разделив выражение (3.9) на w_1 , получим

$$I_2 = (I_1 - I_0) \frac{w_1}{w_2}. \quad (3.10)$$

Расчёт погрешности ТТ с ПХН

Расчёт погрешности при глубоких насыщениях ТТ может быть выполнен при идеализации его кривой намагничивания в виде ПХН.

Аппроксимация характеристики намагничивания ТТ в виде ПХН используется когда ТТ работают с большими погрешностями ($f \geq 40\%$). Схема замещения такого ТТ представлена на рис.3.7.

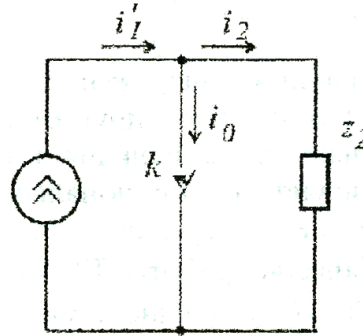


Рисунок 3.7

Если магнитопровод ТТ ненасыщен, т.е. индукция в магнитопроводе B меньше индукции насыщения B_s , то ключ k разомкнут. Когда же индукция B достигает значения B_s , ключ замыкается. Поэтому до насыщения магнитопровода вторичный ток ТТ равен первичному независимо от характера нагрузки ТТ.

Кривые изменения первичного и вторичного токов ТТ для случаев активной, индуктивной и ёмкостной нагрузки показаны на рис.3.8.

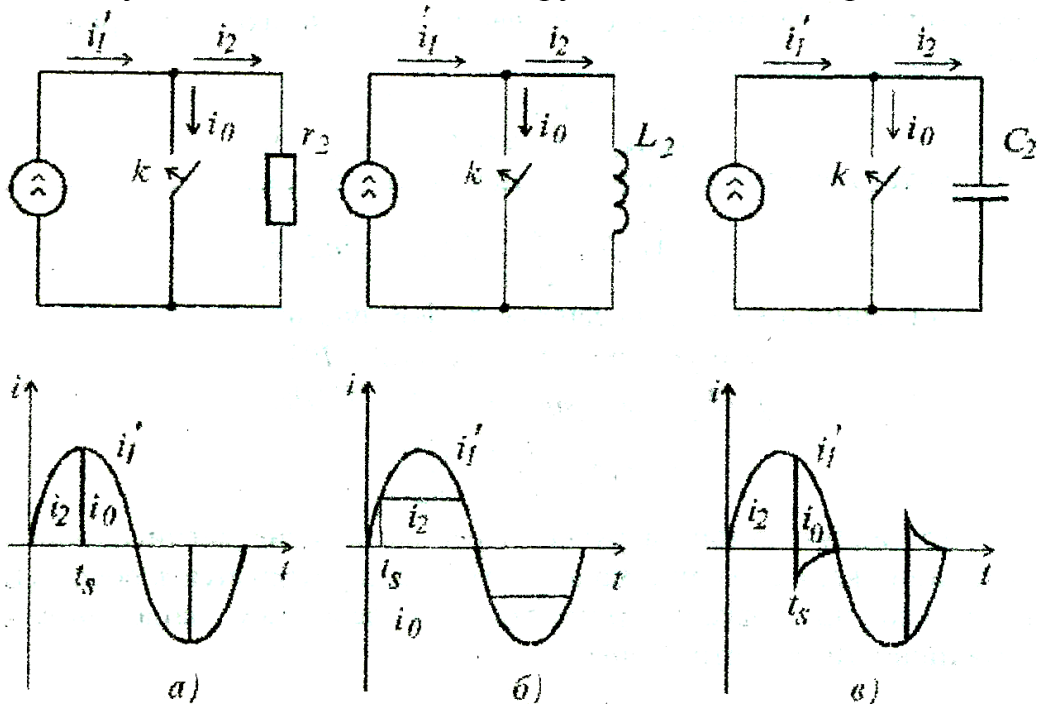


Рисунок 3.8

Кривые построены для случая $B_s = 0,5B_m$ (B_m - максимальная индукция при отсутствии насыщения).

При **активной нагрузке** после насыщения магнитопровода (замыкание ключа k) нагрузка шунтируется ключом и ток намагничивания становится равным первичному току.

Момент насыщения магнитопровода ТТ t_s определяется из уравнения

$$R_2 \int_0^{t_s} i_2 dt = 2\Psi_s. \quad (3.11)$$

В интервале времени $0 - t_s$ происходит перемагничивание магнитопровода от $-\Psi_s$ до $+\Psi_s$, т.е. на величину $2\Psi_s$.

Из уравнения (3.11)

$$t_s = \frac{1}{\omega} \arccos \left(1 - \frac{2\Psi_s}{\Psi_m} \right),$$

где $\Psi_m = I_m R_2 / \omega$.

Зависимость $t_s \left(\frac{\Psi_s}{\Psi_m} \right)$ показана на рис. 3.9.

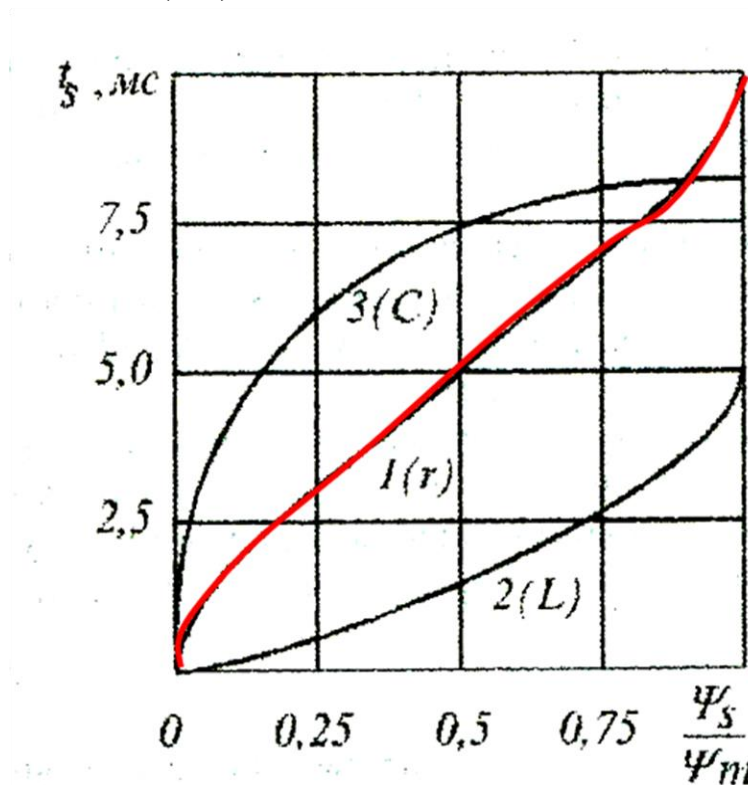


Рисунок 3.9

При индуктивной нагрузке после насыщения магнитопровода нагрузка шунтируется ключом, но ток в ней продолжает протекать под действием запасённой в индуктивности магнитной энергии.

Так как потери отсутствуют, то на интервале времени когда магнитопровод находится в насыщенном состоянии, в нагрузке протекает

постоянный ток, равный i_{2s} . Момент насыщения магнитопровода определяется из уравнения

$$\int_0^{t_s} u_2 dt = L_2 \int_0^{t_s} \frac{di_2}{dt} dt = \Psi_s,$$

откуда $t_s = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{\Psi_s}{\Psi_m}\right)$. Зависимость момента насыщения $t_s\left(\frac{\Psi_s}{\Psi_m}\right)$ для индуктивной нагрузки показана на рис. 3.9.

При активно-индуктивной нагрузке (что обычно имеет место в реальных устройствах) форма кривой вторичного тока имеет промежуточное значение: до насыщения магнитопровода вторичный ток повторяет форму первичного, после насыщения - спадает по экспоненте.

В некоторых случаях ТТ могут работать на ёмкостную нагрузку. В этом случае после насыщения магнитопровода ТТ ток во вторичной цепи протекает за счёт запасённой в конденсаторе электрической энергии. В момент насыщения магнитопровода ТТ вторичный ток скачком меняет свою полярность, а его величина ограничивается только активным сопротивлением во вторичной цепи ТТ.

Момент насыщения магнитопровода (сопротивлением во вторичной цепи пренебрегаем в виду малой его величины) определяем путём решения уравнения

$$\int_0^{t_s} u_2 dt = \frac{I_m}{C_2} \iint_0^{\infty} \sin \omega t dt^2 = \Psi_s.$$

Решая последнее уравнение, получаем трансцендентное уравнение для нахождения t_s

$$\omega t_s - \sin \omega t_s = 2\Psi_s / \Psi_m.$$

После насыщения магнитопровода вторичный ток изменяется по экспоненте с постоянной времени вторичной цепи.

Зависимость момента насыщения $t_s\left(\frac{\Psi_s}{\Psi_m}\right)$ для ёмкостной нагрузки показана на рис. 3.9.

3.2.3. Переходный режим работы ТТ. Условия работы ТТ в устройствах релейной защиты и автоматики значительно отличаются от условий их работы в схемах измерений.

В устройствах защиты в большинстве случаев ТТ должны выполнять свои функции при токах, значительно превышающих номинальный, и в условиях переходного режима, когда кроме принуждённой составляющей в токе появляются и свободные составляющие, в частности - апериодические составляющие.

Ниже рассмотрена работа ТТ в переходном режиме КЗ, когда первичный ток содержит максимальную апериодическую слагающую

$$i_k = I_{mk} (\exp(-t/T_a) - \cos \omega t),$$

где I_{mk} - амплитуда тока КЗ, T_a - постоянная времени первичной цепи.

В переходном режиме магнитопровод перемагничивается по гистерезисным циклам $B(H)$. Многие режимы работы ТТ можно рассчитывать пользуясь тремя наиболее простыми видами характеристик намагничивания ТТ:

- линейной,
- прямоугольной,
- спрямлённой.

Переходный режим ТТ с линейной характеристикой

Этот режим имеет место в слабонагруженном ТТ с замкнутым ферромагнитным сердечником, а также в линейном ТТ (без ферромагнитного сердечника или с немагнитным зазором в сердечнике).

Вторичная нагрузка ТТ R_2 чисто активная, а характеристика ветви намагничивания описывается выражением $\Psi_0 = L_0 i_0$.

Интегрируя систему уравнений (3.4) для принятых условий, получим выражение для вторичного тока:

$$i_2 = I_m \left(\sin \phi \sin(\omega t + \phi) - \cos^2 \phi \exp(-t/T_2) + \frac{T_a \exp(-t/T_2) - T_2 \exp(-t/T_a)}{T_a - T_2} \right),$$

где $\phi = \arctg(\omega L_0 / R_2)$ - угол вторичной цепи ТТ,

$T_2 = L_0 / R_2$ - постоянная времени вторичной цепи.

Ток намагничивания i_0 определяется как разность приведенного первичного и вторичного токов. i_1

Формы кривых первичного i_1 и вторичного i_2 токов, описываемых выражением представлены на рис.3.10. Здесь же показаны схема замещения и зависимость $B(H)$ для линейного ТТ.

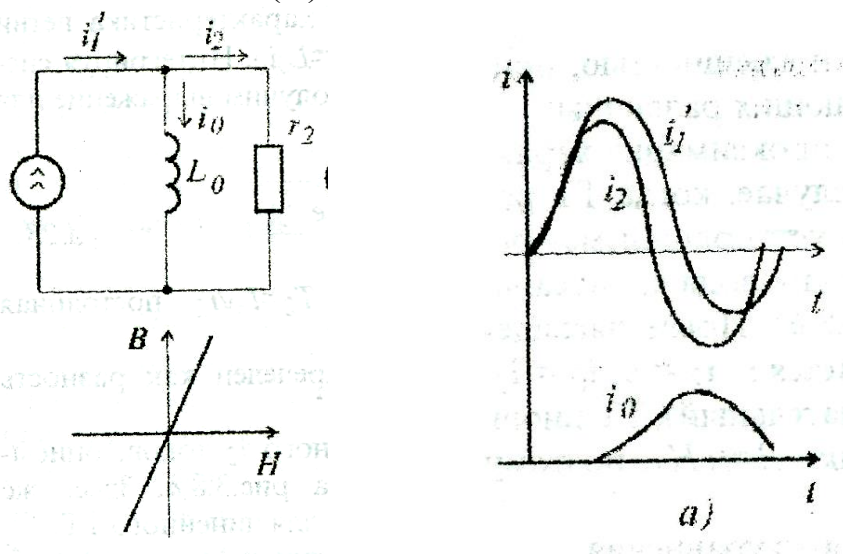


Рисунок 3.10

Переходный процесс в ТТ с ПХН

Такая аппроксимация характеристики намагничивания используется в том случае, когда ТТ работает с большой погрешностью.

Также, как и в установившемся режиме, ТТ с ПХН до момента насыщения магнитопровода t_{s1} идеально трансформирует ток, т.е. $i_2 = i_1$, $i_0 = 0$.

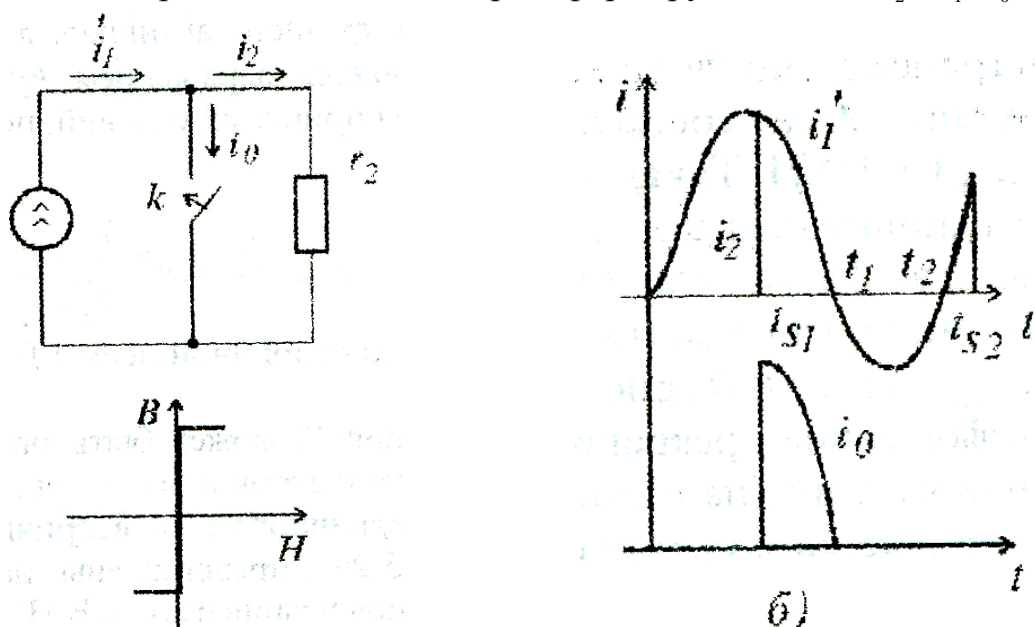


Рисунок 3.11

После насыщения магнитопровода трансформация прекращается: $i_2 = 0$, $i_0 = i_1$.

При изменении знака первичного тока, ТТ вновь работает на вертикальном участке характеристики $B(H)$, поэтому вновь $i_2 = i_1$, $i_0 = 0$.

Первый момент насыщения ТТ определяется из уравнения

$$R_2 \int_0^{t_{s1}} i_1 dt = \Psi_s - \Psi_r,$$

где Ψ_r - остаточное потокосцепление при $t = 0$.

Второй момент насыщения t_{s2} определяется из уравнения

$$R_2 \int_{t_1}^{t_{s2}} i_1 dt = R_2 \int_{t_2}^{t_{s1}} i_1 dt,$$

составленного на основании того, что площадь второй положительной полуволны вторичного тока равна предшествующей отрицательной. Аналогично определяются и последующие моменты насыщения.

Переходный процесс в ТТ с СХН

Спрямлённая характеристика намагничивания занимает промежуточное положение между линейной и прямоугольной. Такая

характеристика и используется для соответствующих промежуточных режимов работы.

До момента насыщения ТТ работает без погрешности, следовательно, $i_2 = i_1$, $i_0 = 0$.

После насыщения магнитопровода вторичный ток определим путём решения системы уравнений (3.4):

$$i_2 = I_m \left(\frac{\sin \phi \sin(\omega t - \phi) - \cos \phi \cos(\omega t_s - \phi) \exp(-(t - t_s)/T_2) + T_2 \exp(-t/T_a) - T_a \exp(-t_s/T_2) \exp(-(t - t_s)/T_2)}{T_2 \exp(-t/T_a) - T_a \exp(-t_s/T_2) \exp(-(t - t_s)/T_2)} \right),$$

где $\phi = \arctg(\omega L_0 / R_2)$ - угол вторичной цепи ТТ,

$T_2 = L_0 / R_2$ - постоянная времени вторичной цепи.

Ток намагничивания равен разности приведенного первичного и вторичного токов. Кривые токов приведены на рис.3.12.

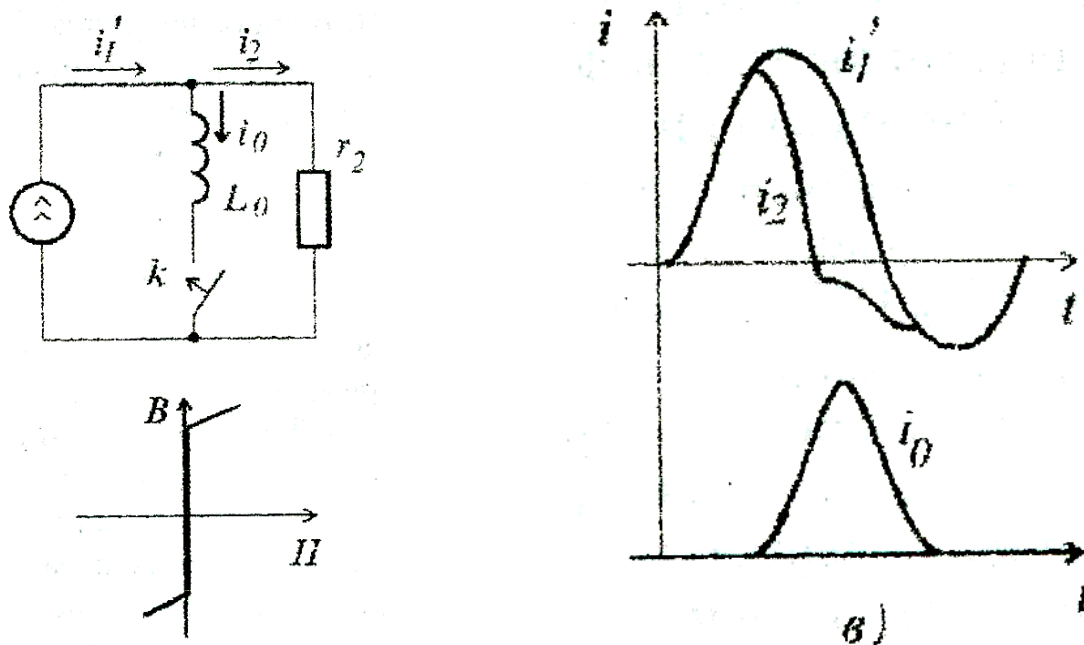


Рисунок 3.12

Контрольные вопросы к главе 3

1. Ток включения однофазного трансформатора на холостой ход.
2. Токи включения трёхфазных трансформаторов на холостой ход.
3. Трансформаторы тока и их математические модели.
4. Какие характеристики намагничивания используются при анализе работы ТТ?
5. Стационарный режим работы ТТ при синусоидальном первичном токе. Векторные диаграммы.
6. Стационарный режим работы ТТ с ПХН при синусоидальном первичном токе.
7. Переходный режим работы ТТ с различными характеристиками намагничивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шимони К. Теоретическая электротехника. - М.: Мир, 1964.-773 с.
2. Теоретические основы электротехники. Под ред. К.М.Поливанова. Т.1. К.М.Поливанов. Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными. -М.: Энергия, 1972.-240 с.
3. Теоретические основы электротехники. Под ред. К.М.Поливанова. Т.2. Жуховицкий Б.Я., Негневицкий И.Б. Линейные электрические цепи (продолжение). Нелинейные цепи.-М.: Энергия, 1972.-200 с.
4. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч.3. Теория электромагнитного поля. - М.: Энергия, 1969.-352 с.
5. Цыгулёв Н.И. Физические основы электроэнергетики. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. - 80 с.
6. Цыгулёв Н.И. Электрические и магнитные явления в энергосистемах: Учеб. пособие Новочеркасск: ЮРГТУ, 2009. -78 с.
7. Цыгулёв Н.И. Нелинейные цепи в электроэнергетике: Учеб. пособие. Новочеркасск: НГТУ, 1997. - 80 с.

Цыгулёв Николай Иосифович

Электрические и магнитные явления в энергосистемах

Компьютерная вёрстка Ликман Л.Г., Тютина Н.М.

Уч.-изд. л. 4,7. Тираж 250 экз.

Заказ № _____

Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт)
Центр оперативной полиграфии ЮРГТУ (НПИ)

Адрес: 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132