

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э. БАУМАНА

Б.В. Стрелков, Ю.Г. Шерстняков

ТРАНСФОРМАТОРЫ
И АСИНХРОННЫЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

*Рекомендовано редсоветом МГТУ им. Н.Э. Баумана
в качестве учебного пособия*

Москва
Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана
2005

УДК 621.313(075.8)

ББК 31.261

С84

Рецензенты: *В.В. Каратаев, В.М. Гридин*

Стрелков Б.В., Шерстняков Ю.Г.

С84 Трансформаторы и асинхронные электрические двигатели: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 36 с.: ил.

Даны основы теории, краткое описание конструкций и анализ свойств и характеристик трансформаторов и асинхронных электрических двигателей общего применения. При изложении материала особое внимание уделено явлениям и процессам, определяющим работу устройств.

Учебное пособие поможет студентам приборных специальностей в освоении теоретического материала по данному разделу электротехники, а также будет полезно при подготовке к рубежному контролю.

Ил. 24. Библиогр. 5 назв.

УДК 621.313(075.8)

ББК 31.261

**Борис Викторович Стрелков
Юрий Георгиевич Шерстняков**

Трансформаторы и асинхронные электрические двигатели
Учебное пособие

Редактор *С.А. Серебрякова*
Корректор *Л.И. Малютина*
Компьютерная верстка *И.А. Марковой*

Подписано в печать 11.07.05. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.
Печ. л. 2,25. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,89. Изд. № 12. Тираж 100 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005

Введение

Теория асинхронных двигателей и трансформаторов составляет неотъемлемую часть раздела общей теории электрических машин, входящего в курс электротехники, читаемый для студентов приборных специальностей.

Асинхронные двигатели осуществляют преобразование электрической энергии в механическую. Электромеханическое преобразование энергии в асинхронном двигателе и в других электрических машинах индуктивного типа основано на явлении электромагнитной индукции и связано с электродвижущими силами (ЭДС), которые индуцируются в процессе периодического изменения магнитного поля, происходящем при механическом перемещении обмоток или элементов магнитопровода.

Это же явление положено в основу работы любого трансформатора. Но обмотки трансформатора и магнитопровод взаимно неподвижны – это статическое устройство. Процесс периодического изменения магнитного поля в трансформаторе, в результате которого в его обмотках индуцируются ЭДС, осуществляется за счет сил электрического поля. Работа трансформатора не связана с преобразованием электрической энергии в механическую. Однако электромагнитные и энергетические процессы, протекающие в трансформаторе, аналогичны процессам, происходящим в асинхронных двигателях и других электромеханических преобразователях индуктивного типа. По этим причинам трансформаторы рассматриваются в разделе общей теории электрических машин.

1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатор (ТР) – статический электромагнитный преобразователь переменного тока одного вида в переменный ток другого вида. В общем случае переменный ток другого вида может отличаться значениями напряжения, тока, частоты, числа фаз. Наиболее широко ТР используются для преобразования напряжения и тока при определенной частоте.

Обычно ТР состоит из замкнутого ферромагнитного сердечника (магнитопровода), на котором размещаются обмотки с различным числом витков. Магнитопровод служит для усиления электромагнитной связи между обмотками. Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечник делают шихтованным из изолированных пластин магнитомягкой стали или витым из тонкой стальной ленты. В высокочастотных и импульсных ТР применяют прессованные сердечники из ферритов.

1.1. Основные процессы в трансформаторе

Существует большое разнообразие ТР, однако рабочие процессы в них могут исследоваться с помощью простой модели однофазного ТР (рис. 1.1), содержащей замкнутый сердечник с двумя обмотками: первичной с w_1 витками и вторичной с w_2 витками. Если к первичной обмотке ТР подвести напряжение u_1 при разомкнутой вторичной обмотке, то по ней потечет ток холостого хода (ХХ) $i_1 = i_0$ ($i_2 = 0$).

Намагничивающая сила (магнитодвижущая сила – МДС) первичной обмотки $i_1 w_1 = i_0 w_1$ создает в трансформаторе поток $\Phi_{11}(t)$, большая часть которого $\Phi_1(t) = \Phi_0(t)$ замыкается по сердечнику, сцепляясь с витками w_1 и w_2 . Меньшая его часть $\Phi_{\lambda 1}(t)$ – поток рассеяния – сцепляется только с витками w_1 , проходя в основном по воздуху. Поэтому его потокосцепление пропорционально току i_1 : $\Psi_{\lambda 1} = w_1 \Phi_{\lambda 1} = L_{\lambda 1} i_1$, где $L_{\lambda 1}$ – индуктивность первичной обмотки от потока рассеяния.

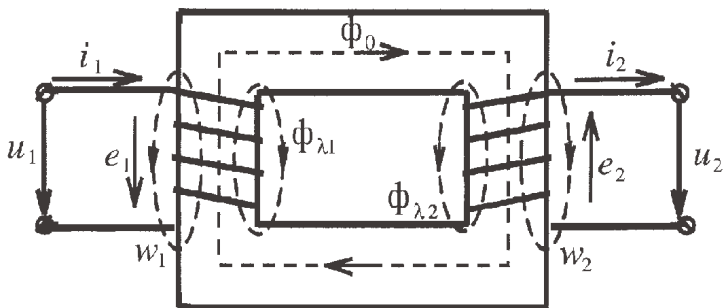


Рис. 1.1

Переменные потоки наводят в первичной и вторичной обмотках ЭДС: $e_1 = -w_1 d\Phi_0(t)/dt$, $e_{\lambda 1} = -d\Psi_{\lambda 1}(t)/dt = -L_{\lambda 1} di_1(t)/dt$, $e_2 = -w_2 d\Phi_0(t)/dt$.

Уравнения напряжений Кирхгофа первичной и вторичной обмоток имеют вид

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{\lambda 1} di_1(t)/dt + w_1 d\Phi_0(t)/dt = R_1 i_1 + L_{\lambda 1} di_1(t)/dt - e_1, u_2 = e_2.$$

Если к вторичной обмотке подключить сопротивление нагрузки, то по обмотке потечет ток i_2 , а ее МДС $i_2 w_2$ создаст проток $\Phi_{22}(t)$, большая часть которого $\Phi_2(t)$ будет также замыкаться по сердечнику, сцепляясь с витками w_1 и w_2 , а меньшая — $\Phi_{\lambda 2}(t)$ с w_2 : $\Psi_{\lambda 2} = w_2 \Phi_{\lambda 2} = L_{\lambda 2} i_2$, где $L_{\lambda 2}$ — индуктивность вторичной обмотки от потока рассеяния.

Появление тока i_2 вызовет соответствующее изменение тока i_1 и намагничивающей силы $i_1 w_1$. Под действием МДС $(i_1 w_1 + i_2 w_2)$ в сердечнике образуется результирующий поток $\Phi(t) = \Phi_1(t) + \Phi_2(t)$. Согласно правилу Ленца, поток $\Phi_2(t)$ направлен навстречу потоку $\Phi_1(t)$.

Чему же будет равен результирующий поток? Для выяснения сущности вопроса рассмотрим процессы в идеальном ТР, пренебрегая потерями в стали, потерями в меди и потоками рассеяния как в режиме ХХ, так и в режиме нагрузки.

В режиме ХХ напряжение питания уравнивается наведенной в этой обмотке ЭДС $e_1 = -w_1 d\Phi_0(t)/dt$: $u_1 + e_1 = 0$. В режиме нагрузки также $u_1 + e_1 = 0$, но $e_1(t) = -w_1 d[\Phi_1(t) + \Phi_2(t)]/dt$. Очевидно, если напряжение $u_1(t)$ идеального ТР при нагрузке остается неизменным, то значение ЭДС $e_1(t)$ будет таким же, как и при ХХ, т. е. $\Phi_1(t) + \Phi_2(t) = \Phi_0(t)$.

Неизменность магнитного потока при переходе от режима ХХ к режиму нагрузки является важнейшим свойством ТР. Из него следует закон равновесия МДС в ТР: $i_0 w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2$. Основная закономерность работы идеального ТР справедлива и для реальных ТР: размагничивающее действие потока $\Phi_2(t)$ компенсируется увеличением МДС $i_1 w_1$ на значение $(-i_2 w_2)$, а $i_0 w_1$ идет на создание потока $\Phi_0(t)$ в сердечнике. Количественные ошибки, вызванные идеализацией ТР, легко учесть в расчетах. Физический процесс, который происходит в ТР при нагрузке, можно представить схематично (рис. 1.2.)

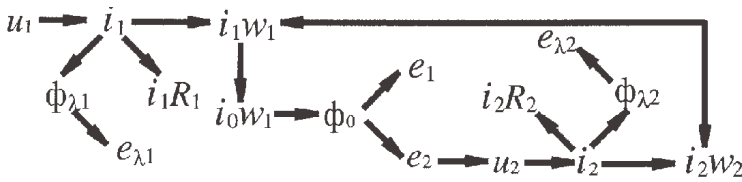


Рис. 1.2

Уравнения ТР в режиме нагрузки имеют вид

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{\lambda 1} di_1(t)/dt + w_1 d\Phi_0(t)/dt = R_1 i_1 + L_{\lambda 1} di_1(t)/dt - e_1 ;$$

$$-w_2 d\Phi_0(t)/dt = e_2 = R_2 i_2 + L_{\lambda 2} di_2(t)/dt + u_2 ;$$

$$i_1 w_1 = i_0 w_1 + (-i_2 w_2) \Rightarrow i_1 = i_0 + (-i_2 w_2 / w_1) = i_0 + i_k ,$$

где $i_k = (-i_2 w_2 / w_1)$ – компенсационный ток, входящий в состав тока i_1 . МДС, создаваемая током i_k , равна по значению и противоположна по фазе МДС вторичной обмотки.

1.2. Комплексные уравнения трансформатора

Уравнения ТР в режиме нагрузки являются нелинейными вследствие нелинейной связи между потоком Φ_0 и МДС ($i_1 w_1 + i_2 w_2$), поэтому при синусоидальном входном напряжении $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$ периодические токи, потоки и напряжения являются не-синусоидальными. Заменяя их эквивалентными синусоидами, можем написать уравнения в комплексной форме:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\lambda 1} \underline{I}_1 - \underline{E}_1, \quad \underline{E}_2 = R_2 \underline{I}_2 + jX_{\lambda 2} \underline{I}_2 + \underline{U}_2 ,$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}_2 \omega_2 / \omega_1), \underline{\Phi}_m = \underline{\Phi}_{1m} + \underline{\Phi}_{2m} = \underline{\Phi}_{0m},$$

где $\underline{U}_2 = Z_{\text{н}2} \underline{I}_2$; $X_{\lambda 1} = 2\pi f L_{\lambda 1}$, $X_{\lambda 2} = 2\pi f L_{\lambda 2}$.

Положим, что эквивалентная синусоида основного магнитного потока имеет вид $\phi_0(t) = \Phi_m \sin \omega t$, тогда $e_1 = -\omega_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - \pi/2)$, $e_2 = -\omega_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin(\omega t - \pi/2)$, т. е. ЭДС изменяются синфазно и отстают по фазе от потока на угол $\pi/2$. Действующее значение ЭДС $E_1 = E_{1m} / \sqrt{2} = (2\pi / \sqrt{2}) \omega_1 \omega \Phi_m = 4,44 \omega_1 \omega \Phi_m = 4,44 \omega_1 f S B_m$, $E_2 = E_{2m} / \sqrt{2} = (2\pi / \sqrt{2}) \omega_2 \omega \Phi_m = 4,44 \omega_2 \omega \Phi_m = 4,44 \omega_2 f S B_m$, где S – эффективное сечение магнитопровода, м².

Коэффициент трансформации ТР $k = e_1/e_2 = \omega_1/\omega_2 = E_1/E_2$; $k \neq U_1/U_2$, $k \cong U_1/U_2$, так как в режиме ХХ $U_2 = E_2$, а $U_1 \cong E_1$, т. е. приближенно равны, поскольку $|R_1 \underline{I}_0 + jX_{\lambda 1} \underline{I}_0| \ll U_1$. Принимая это во внимание, получаем $U_1 \approx 4,44 \omega_1 f S B_m$. Из этого выражения также следует, что значение основного магнитного потока не зависит от нагрузки ТР при неизменном напряжении U_1 : $\Phi_m = \Phi_{0m}$. Однако нужно иметь в виду, что это выражение является приближенным и соответствует нагрузке, не превышающей номинальную. При заданных U_1 и f это выражение позволяет выбрать конструктивные параметры ТР ω_1 и S , задаваясь рабочим значением индукции в магнитопроводе ($1,0 \leq B_m \leq 1,5$).

Переменный магнитный поток ϕ_0 перемагничивает магнитопровод ТР с частотой f , вызывая в нем магнитные потери от гистерезиса и вихревых токов. Мощность магнитных потерь эквивалентна активной составляющей тока $I_0 - I_{0a}$, его реактивная составляющая I_{0p} (намагничивающий ток) идет на создание потока ϕ_0 . Таким образом, ток ХХ имеет две составляющие: $I_0 = (I_{0a}^2 + I_{0p}^2)^{1/2}$. Из-за наличия магнитных потерь ток $\underline{I}_0$ не совпадает по фазе с потоком $\underline{\Phi}_m$, опережая его на угол $\delta = \arctg(I_{0a}/I_{0p})$, который называют углом магнитных потерь. Этот угол увеличивается с ростом магнитных потерь.

В ТР большой и средней мощности ($P > 500$ Вт) ток I_0 составляет 2 ... 10 % от номинального тока первичной обмотки и при нагрузке, близкой к номинальной, током I_0 иногда пренебрегают при анализе процессов, считая, что $I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$, или $I_1/I_2 = \omega_2/\omega_1$.