

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Трансформаторы

Учебное пособие

Петрозаводск
2012

ББК 31.2
УДК 621.3

Рецензенты:

Г.Б. Стефанович, д.ф.-м.н., профессор
П. П. Борисков, к.ф.-м.н., доцент

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Петрозаводского государственного университета

Н. А. Кулдин

Трансформаторы: Учеб. пособие / Н. А. Кулдин; ПетрГУ – Петрозаводск, 2011. – 38 с.

ISBN

В предлагаемом учебном пособии с единых методических позиций изложены общие вопросы теории трансформатора, рассмотрены основные физические законы и процессы в установившихся и переходных режимах.

Пособие предназначено для студентов физико-технического факультета, изучающих курсы «Электротехника и электроника», «Трансформаторы и электронные аппараты», а так же для студентов инженерных специальностей, слушающих курс «Общая электротехника».

© Н. А. Кулдин, 2012
© Петрозаводский государственный университет, 2012

ISBN

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Трансформаторы	6
2. История создания трансформаторов	7
3. Классификация трансформаторов	9
4. Устройство и принцип действия трансформатора	11
5. Потери и КПД трансформатора	14
6. Уравнение намагничивающих сил и токов	22
7. Параметры и характеристики трансформаторов	24
7.1. Опыт холостого хода	25
7.2. Опыт короткого замыкания	27
8. Приведенный трансформатор	29
9. Электрическая схема замещения трансформатора	30
10. Трёхфазные трансформаторы	32
11. Схемы обмоток трехфазных трансформаторов и группы соединения	35
Список литературы	37

Работа выполнена при поддержке Федерального Агентства по науке и инновациям РФ, ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009-2013)”, государственные контракты № 16.740.11.0562, № 14.740.11.0895, № 14.740.11.0137, № П1156, № П1220, № 02.740.11.5179, № 02.740.11.0395, а также АВЦП “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011)”, проект № 12871.

ВВЕДЕНИЕ

Уровень развития материальной культуры человеческого общества в первую очередь определяется созданием и использованием источников энергии. Почти вся энергия в настоящее время вырабатывается электрическими машинами. Для передачи и распределения электроэнергии требуются трансформаторы и автотрансформаторы. Кроме того, две трети электроэнергии, выработанной на электростанциях, преобразуется различными электроприводами в механическую энергию. Цепочку получения энергии потребителем можно представить следующим образом

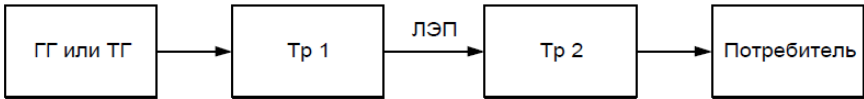


Рис. 1. Получение энергии потребителем.

Поясним данную блок-схему. Гидрогенератор (**ГГ**) преобразует механическую энергию падающей воды в электрическую. Или турбогенератор (**ТГ**) преобразует механическую энергию расширяющегося пара в электрическую энергию. Линия электропередачи (**ЛЭП**) служит для того чтобы передавать энергию на дальние расстояния. Потери электроэнергии в проводах зависят от силы тока.

$$\Delta P = I_{л}^2 \cdot R_{л},$$

где $I_{л}$ – величина тока в ЛЭП, $R_{л}$ – сопротивление ЛЭП.

Поэтому при передаче энергии на дальние расстояния, напряжение многократно повышают (во столько же раз уменьшая силу тока) с помощью трансформатора (**Тр1**), что при передаче той же мощности позволяет значительно снизить потери. Однако с ростом напряжения начинают происходить различного рода разрядные явления. При длине ЛЭП переменного тока

более нескольких тыс. км, наблюдается ещё один вид потерь — радиоизлучение. Так как такая длина линии L уже сравнима с длиной электромагнитной волны частотой 50 Гц, провод работает как антенна.

$$L = \frac{c}{f} \approx \frac{300000 \text{ км} / \text{с}}{50 \text{ Гц}} = 6000 (\text{км}),$$

Так же в воздушных линиях высокого напряжения возникают потери активной мощности на корону (коронный разряд).

Тр2 - трансформаторы, понижающие высокое напряжение до промышленного напряжения $U=380$ В промышленной частоты $f=50$ Гц.

Потребители – это различного рода электродвигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую. Основная доля потребления электроэнергии в промышленности приходится именно на различного рода электродвигатели.

Обладая высокими энергетическими показателями и меньшими, по сравнению с другими преобразователями энергии, расходами материалов на единицу мощности, экологически чистые электромеханические преобразователи имеют в жизни человеческого общества огромное значение. Несомненно, что электрические машины занимают важное место в промышленности, а данная дисциплина является одной из фундаментальных дисциплин электротехнического цикла.

С развитием автоматических систем управления все большее значение приобретают электрические микромашины, которые используются в качестве исполнительных двигателей в системах автоматики и телемеханики.

1. Трансформаторы

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, преобразующий напряжение и ток первичной обмотки в напряжения и токи вторичных обмоток при неизменной частоте питающего напряжения. В трансформаторе нет вращающихся частей, поэтому он не является машиной в обычном смысле этого слова. Однако преобразование электроэнергии в нем происходит на основе тех же законов электричества и магнетизма, как и в электрических машинах. В частности, теория трансформаторов очень схожа с теорией асинхронных машин, поэтому трансформаторы составляют неотъемлемую часть курса электрических машин.

Генераторы электрических станций вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6, 10, 15 кВ, так как на более высокие напряжения конструировать электрогенераторы сложно в связи с трудностью обеспечить хорошую изоляцию обмоток.

В то же время в линиях электропередачи применяют напряжения до 110, 220, 400, 500 кВ и более, чтобы уменьшить силу тока в линии, а значит и сечение проводов, что позволяет резко снизить мощность потерь и стоимость линий электропередач.

Таким образом, необходимы повышающие трансформаторы, увеличивающие напряжение генераторов электрических станций до напряжения линий электропередач.

В местах же потребления электрической энергии, на производстве, в быту и так далее необходимы понижающие трансформаторы, чтобы иметь напряжения 380, 220, 127 В и менее.

Электрические трансформаторы имеют высокий коэффициент полезного действия, достигающий до 99 % и высокую надежность, так как не содержат движущихся частей.

2. История создания трансформаторов

Схематичное изображение будущего трансформатора впервые появилось в 1831 году в работах Фарадея и Генри. Однако ни тот, ни другой не отмечали в своем приборе такого свойства трансформатора, как изменение напряжений и токов, то есть трансформирование переменного тока.

В 1836 году ирландский физик Николас Каллан изобрел индукционную катушку. В 1838 году это изобретение повторил американский изобретатель Чарльз Пейдж, но наибольшую известность получил немецкий механик Генрих Румкорф, именем которого впоследствии стали называть индукционную катушку.

Изобрел электрический трансформатор в 1876 году Павел Николаевич Яблочков, который в своих работах по электрическому освещению встретился с необходимостью обеспечить автономную работу нескольких светильников с разным напряжением от одного генератора.

Новым шагом в использовании трансформаторов с разомкнутым сердечником для распределения электроэнергии явилась «система распределения электричества для производства света и двигательной силы», запатентованная во Франции в 1882 году Голяром и Гиббсом. Трансформаторы Голяра и Гиббса предназначались уже для преобразования напряжения, то есть имели коэффициент трансформации отличный от единицы. Трансформаторы с разомкнутым сердечником в 1883 году устанавливаются на подстанциях Лондонского метрополитена, а в 1884 году – в Турине (Италия).

Первые трансформаторы с замкнутыми сердечниками были созданы в Англии в 1884 году братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсон. Сердечник этого трансформатора набран был из стальных полос или проволок, разделенных изоляционным материалом, что снижало потери на вихревые токи. На сердеч-

нике помещались, чередуясь, катушки высшего и низшего напряжения.

Первые предложения о параллельном включении трансформаторов высказал Р. Кеннеди в 1883 году, но более всесторонне этот способ соединения был обоснован венгерским электротехником Максом Дери, который в 1885 году получил патент на параллельное включение первичных и вторичных обмоток трансформаторов и показал преимущество такого включения. Независимо от него аналогичный патент в Англии получил С.Ц. Ферранти.

Передача электрической энергии переменным током высокого напряжения оказалась возможной после создания однофазного трансформатора с замкнутой магнитной системой. Такой трансформатор в нескольких модификациях (кольцевой, броневой и стержневой) был разработан в 1885 году венгерскими электротехниками М. Дерри, О. Блати и К. Циперновским, впервые предложившими и сам термин трансформатор. Венгерские инженеры нашли оптимальное соотношение между расходом меди и стали в трансформаторах.

Русский инженер **Михаил Осипович Доливо-Добровольский** выступил с предложением применять для целей передачи и эксплуатации электроэнергии разработанную им систему трехфазного тока. Доливо-Добровольский показал, что в отношении передачи электроэнергии система трехфазного тока, по сравнению с системой двухфазного тока, является более экономичной, но решающее преимущество трехфазной системы он видел «в превосходных качествах» разработанных им трехфазных асинхронных двигателей. В этом направлении он провел огромную творческую работу: доказал, что при помощи трехфазного тока можно создать в машине такое же вращающееся магнитное поле, как и при помощи двухфазного тока, разработал основные модификации трехфазного асинхронного двигателя. Параллельно с этим Доливо-Добровольский разрабо-

тал конструкцию трехфазного трансформатора сначала, в 1890 г., с расположением сердечников по кругу и кольцевыми ярмами, а затем с обычным в настоящее время расположением стержней в одной плоскости. А так как, кроме этого, Доливо-Добровольский много работал в области теории, расчета и конструирования электрических машин, то можно сказать, что он разработал собственно все элементы трехфазной системы. Предложенная Доливо-Добровольским система трехфазного тока вызвала живейший интерес и привлекла к себе повсеместное внимание. Несмотря на ряд возражений, ее технические достоинства были настолько велики и очевидны, что уже в ближайшее время она заняла ведущее место в ряду других систем.

3. Классификация трансформаторов

1. По своему назначению:

– Силовые.

Применяются в системах передачи и распределения электроэнергии; для установок со статическими преобразователями (ионными или полупроводниковыми) при преобразовании переменного тока в постоянный (выпрямители) или постоянно-го в переменный (инверторы); для получения требуемых напряжений в цепях управления электроприводами и в цепях местного освещения.

– Силовые специального назначения (например, печные, сварочные т. п. трансформаторы).

– Измерительные (трансформатор тока или напряжения).

Используются для включения электрических измерительных приборов в сети высокого напряжения или сильного тока.

– Испытательные.

Для получения высоких и сверхвысоких напряжений, необходимых при испытаниях на электрическую прочность электроизоляционных изделий;

- Радиотрансформаторы.

Применяются в устройствах радио- и проводной связи, в системах автоматики и телемеханики для получения требуемых напряжений, согласования сопротивлений электрических цепей, гальванического разделения цепей и др.

2. По виду охлаждения:

- Сухие.

В сухих трансформаторах охлаждение осуществляется при естественной или принудительной конвенции воздуха, т.е. воздушное охлаждение.

- Масляные.

В масляных трансформаторах охлаждение осуществляется при естественной или принудительной циркуляции трансформаторного масла, т.е. масляное охлаждение.

3. По числу фаз питающей сети:

- Однофазные.

- Трехфазные.

4. По форме магнитопровода (сердечника):

- Стержневые.

- Броневые.

- Торoidalные.

- Овальные.

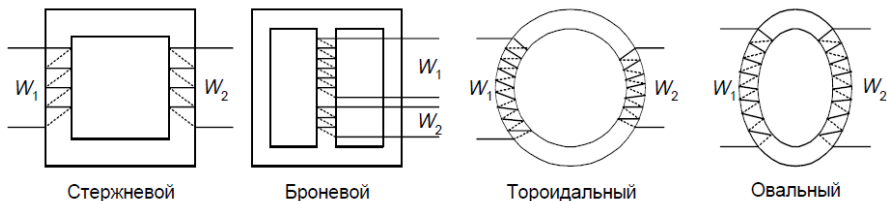


Рис. 2. Виды сердечников трансформаторов.

Здесь W_1 и W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора соответственно. Сердечники стержневого и броневого трансформаторов выполняются из листов электротехнической стали, а сердечники овального и тороидального трансформаторов – из ленты электротехнической стали. Пластины и полоска ленты сердечников трансформаторов электрически изолируются друг от друга слоем лака.

5. По числу обмоток:

- Двухобмоточные.
- Многообмоточные (одна первичная и две или более вторичных обмоток).

6. По конструкции обмоток:

- Цилиндрические.
- Концентрические.
- Дисковые.

7. По соотношению напряжений обмоток:

- Повышающий ($U_2 > U_1$).
- Понижающий ($U_2 < U_1$).

4. Устройство и принцип действия трансформатора

Простейший силовой трансформатор состоит из ферромагнитного сердечника (магнитопровода) и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (Рис. 3.). Магнитопровод набран из изолированных друг от друга листов электротехнической стали толщиной 0.3-0.5 мм, с целью уменьшения потерь на вихревые токи или токи Фуко (потери в стали).

Обмотка трансформатора, соединенная с источником питания, называется **первичной**, а обмотка, к которой подключается потребитель электроэнергии, называется **вторичной**. Параметры, относящиеся к первичной обмотке, обозначаются ин-

дексом 1, например, w_1 , u_1 , i_1 , относящиеся к вторичной обмотке – обозначают с индексом 2.

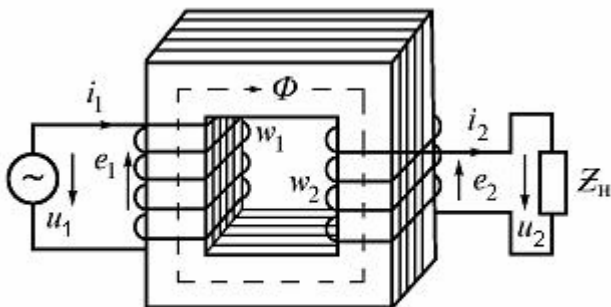


Рис. 3. Принципиальная схема трансформатора.

На щитке трансформатора указывают его номинальное напряжение, полную мощность, токи, напряжение короткого замыкания, число фаз, частоту, схему соединения, режим работы и способ охлаждения.

В зависимости от напряжения различают обмотку высшего напряжения (ВН) и обмотку низшего напряжения (НН). Если первичное напряжение U_1 больше вторичного U_2 , трансформатор называют **понижающим**, если наоборот $U_1 < U_2$ – **повышающим**.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Под воздействием переменного синусоидального тока первичная обмотка создает в магнитопроводе переменный магнитный поток:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t ,$$

который пронизывает обе обмотки и индуцирует в них ЭДС:

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = \\ = \omega w_1 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = \\ = \omega w_2 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_{2m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

т.е. ЭДС отстает по фазе от магнитного потока на $\pi/2$. Из этих формул получаем действующее значение ЭДС в обмотках:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{(2\pi f) w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 \Phi_m,$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{(2\pi f) w_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_2 \Phi_m,$$

Соотношение ЭДС обмоток называется коэффициентом трансформации:

$$\boxed{\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k}$$

Если $k > 1$, то вторичная ЭДС меньше первичной и трансформатор называется **понижающим**, при $k < 1$ – трансформатор **повышающий**.

Применяют и другое определение для коэффициента трансформации: **отношение номинального высшего напряжения трансформатора к номинальному низшему напряжению**. В этом случае коэффициент трансформации всегда больше единицы: $k > 1$.

Так как во вторичной обмотке индуцируется ЭДС, то при подключении нагрузки к ее выводам в контуре обмотка-нагрузка протекает ток и выделяется электрическая энергия. Таким образом, с помощью магнитной связи поток электрической энергии передается из первичной цепи во вторичную цепь. В этом и состоит **принцип работы трансформаторов**.

Трансформатор — это аппарат переменного тока и на постоянном токе работать не может, потому что при постоянном магнитном потоке ($\Phi = \text{const}$) ЭДС в обмотках не индуцируется ($d\Phi/dt = 0$). Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть постоянного тока на такое же напряжение как и при переменном токе, то трансформатор сгорит, потому что в нем не будет индуцироваться ЭДС E_1 и напряжение сети будет уравниваться только падением напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки, которое мало и, следовательно, ток в первичной обмотке будет очень велик. Индуктирование ЭДС в цепях переменного тока и за счет этого уменьшение потребляемого тока присуще всем устройствам переменного тока.

5. Потери и КПД трансформатора

Сердечник выполняют из листов или ленты электротехнической стали, т.е. шихтованный. Электротехническая сталь хорошо проводит магнитный поток, имеет относительно большое удельное электрическое сопротивление и малую площадь петли гистерезиса.

Удельное электрическое сопротивление стали повышают добавлением в сталь кремния. Сердечник набирают из пластин или делают из ленты для уменьшения потерь энергии на вихревые токи или токи Фуко.

Рассмотрим часть магнитопровода (рис. 4.). Магнитный поток в сердечнике является пульсирующим, т.е. изменяющим

свою величину и направление во времени. Он индуцирует ЭДС не только в обмотках трансформатора, но и в сердечнике. ЭДС e_v – индуцированная в сердечнике, вихревая, создает вихревой ток i_v по правилу Ленца такого направления, чтобы магнитный поток от вихревого тока был направлен против магнитного потока, который индуцирует данный вихревой ток. Направление вихревого потока определяется по правилу правого буравчика.

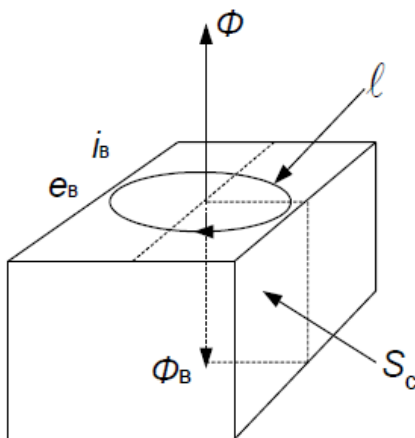


Рис. 4. Направление вихревого тока и потока в сердечнике трансформатора.

Электрическое сопротивление на пути вихревого тока можно записать в виде:

$$R_v = \rho_c \frac{l}{S_c},$$

где ρ_c – удельное электрическое сопротивление стали, l – длина линии тока, S_c – сечение сердечника, через которое проходит ток.

Величина вихревого тока определяется как:

$$I_{\epsilon} = \frac{E_{\epsilon}}{R_{\epsilon}},$$

Таким образом, если сопротивление на пути вихревого тока R_{ϵ} мало, то ток I_{ϵ} велик.

Мощность потерь от вихревых токов равна:

$$P_{\epsilon} = I_{\epsilon}^2 \cdot R_{\epsilon} = \frac{E_{\epsilon}^2}{R_{\epsilon}},$$

В сплошном сердечнике мощность потерь от вихревых токов получается большой, потому что сечение, через которое замыкается ток, является большим. Для уменьшения потерь сердечник набирают из пластин — шихтуют, причем пластины электрически изолируют друг от друга слоем лака (рис. 5.).

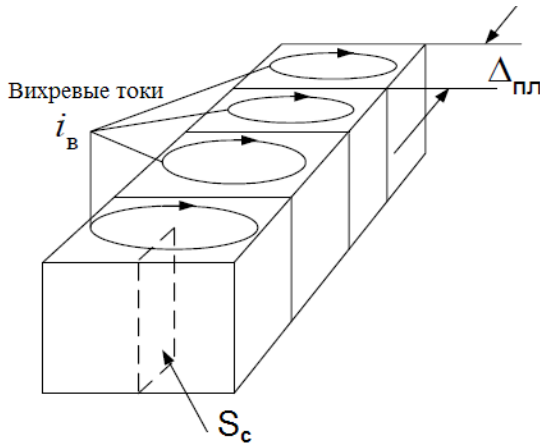


Рис 5. Вихревые токи в шихтованном сердечнике.

При этом сечение стали S_c , через которое проходит вихревой ток, получается малым, а сопротивление R_{ϵ} большим, поэтому величина вихревого тока I_{ϵ} оказывается небольшой и,

следовательно, становится малой мощность потерь P_e в стали магнитопровода.

Мощность потерь можно еще уменьшить за счет увеличенного удельного электрического сопротивления стали путем добавления в нее кремния.

Магнитное состояние сердечника изменяется по петле гистерезиса (рис. 6.), где B , Тл – магнитная индукция, H , А/м – напряженность магнитного поля.

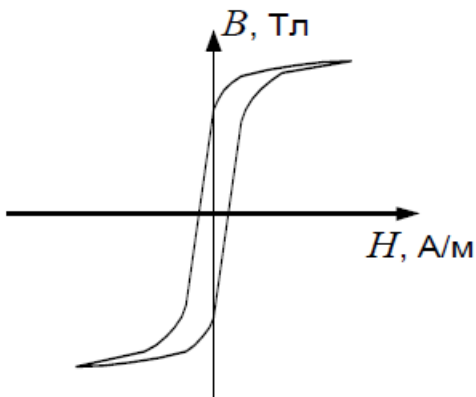


Рис. 6. Петля гистерезиса для электротехнической стали.

Потери энергии при перемагничивании сердечника пропорциональны площади петли гистерезиса за один цикл изменения тока, магнитного потока или напряженности.

Электротехническая сталь имеет узкую петлю гистерезиса, площадь петли S_H мала (рис. 6.). Мощность потерь энергии на вихревые токи и гистерезис можно определить по формуле:

$$P_c = K_{\text{обр}} P_{\text{уд}} M \left(\frac{B_m}{1 \text{ Тл}} \right)^2 \left(\frac{f}{50 \text{ Гц}} \right)^{1,5}, \text{ Вт}$$

где $K_{обр}$ — коэффициент обработки, равный $2 \div 2,4$, который учитывает увеличение потерь при частичном перемагничивании пластин, например из-за заусенцев; $p_{уд}$, Вт/кг — удельные потери мощности для данной марки стали при амплитуде магнитной индукции $B_m=1$ Тл и частоте $f=50$ Гц (данная величина обычно приводится в справочниках); M , кг — масса сердечника. Формула позволяет вычислить мощность потерь в стали и при B_m , отличающейся от 1 Тл, и частоте f , отличной от 50 Гц.

Магнитные потери — это потери энергии в стали, на вихревые токи и гистерезис, которые нагревают сердечник. Таким образом, магнитные потери зависят от частоты переменного тока и магнитной индукции. При неизменном первичном напряжении магнитные потери от нагрузки не зависят, поэтому их называют *постоянными*.

Обмотки выполняют из изолированного медного или алюминиевого провода. Каждый провод имеет свою маркировку. В частности, в трансформаторах малой мощности обмотки могут быть выполнены из медного провода марки ПЭВ-2. Здесь П — означает провод, Э — эмалевая изоляция, В — высокопрочная, 2 — двухслойная изоляция.

Мощность потерь энергии в обмотках можно вычислить по закону Джоуля-Ленца:

$$P_{об1} = I_1^2 \cdot r_1, \text{ Вт}$$

Здесь I_1 , А — действующее значение тока в первичной обмотке, r_1 , Ом — активное сопротивление первичной обмотки. Аналогично определяется мощность потерь во вторичной обмотке. Эти потери нагревают обмотки, сопротивление которых в свою очередь зависит от температуры.

Электрические потери, т.е. потери в обмотках трансформатора, связанные с их нагревом, называют *переменными*, так как величина этих потерь прямо пропорциональна квадрату тока в обмотках.

Мощность трансформатора ограничивается допустимой температурой нагрева обмоток, которая определяется термостойкостью изоляции. Изоляция бывает различных классов: А, В, С, D, Е, F, ... Для класса А допустимая температура нагрева составляет 105°C, для проводов с эмалевой изоляцией допустимая температура нагрева составляет 115°C, для проводов с термостойкой изоляцией – 250°C. При превышении этой температуры электрическая изоляция стареет и срок службы трансформаторов уменьшается. Происходит электрическое и механическое старение. При электрическом старении теряются изолирующие свойства, при механическом – изоляция становится хрупкой, механическая прочность уменьшается.

Потери энергии в трансформаторе кроме нагрева уменьшают его КПД, который определяется отношением активных мощностей на выходе и входе трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_M + P_3},$$

где P_1 – активная мощность, подведенная к первичной обмотке; P_2 – выходная мощность трансформатора; P_M – мощность магнитных потерь т.е. потери в стали сердечника; P_3 – мощность электрических потерь в обмотках.

Из формулы для КПД следует, что чем меньше мощности потерь в стали сердечника и обмотках, тем выше КПД трансформатора. КПД трансформаторов выше, чем электрических машин, что частично объясняется отсутствием механических потерь. Максимальный КПД силовых трансформаторов достигает 99,5 %. Поэтому определение КПД трансформаторов с достаточной точностью возможно лишь косвенным методом – путем определения потерь по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания. Метод непосредственного определения КПД путем измерения активных мощностей P_1 и P_2 дает значительную ошибку из-за погрешностей измерения.

Магнитные потери P_M определяются мощностью холостого хода P_0 при номинальном подведенном напряжении, т.е. из опыта холостого хода (см. параграф §7.1). Величина электрических потерь P_{Σ} принимается равной потерям короткого замыкания P_K (см. параграф §7.2).

Если известна мощность P_K при номинальных токах, то электрические потери при любой нагрузке:

$$P_{\Sigma} = \beta^2 \cdot P_K,$$

где $\beta = I_2/I_{2ном}$ – коэффициент нагрузки.

Суммарные потери в трансформаторе:

$$\sum P = P_{\Sigma 1} + P_M + P_{\Sigma 2} = P_0 + \beta^2 \cdot P_K,$$

Возвращаясь к формуле КПД, получим:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K},$$

Активная мощность на выходе трансформатора:

$$P_2 = \beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2,$$

В итоге получаем:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K},$$

или в таком виде:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_K}{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K}$$

При малых нагрузках трансформатора $\beta \approx 0,2$ зависимость линейна и быстро возрастает, так как потери к.з. относительно малы. При дальнейшем увеличении нагрузки трансформатора $\beta \approx 0,2 \div 0,85$ рост КПД замедляется и достигает пологого максимума, так как сказывается рост потерь короткого замыкания пропорциональных квадрату тока.

Величина КПД трансформатора зависит от величины нагрузки (β) и ее характера ($\cos \varphi_2$).

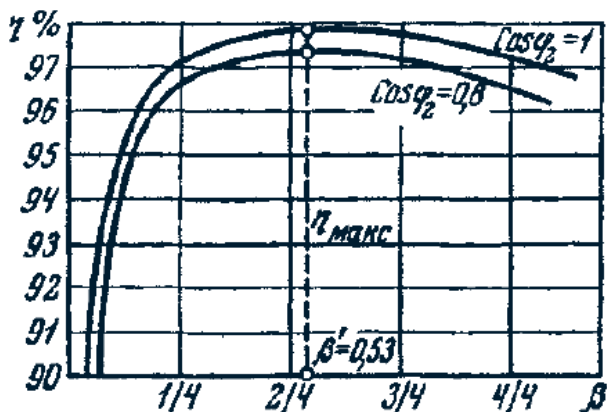


Рис.7. График зависимости КПД трансформатора от нагрузки.

Условие максимального значения КПД (экстремум функции):

$$\frac{\partial \eta}{\partial \beta} = 0,$$

Легко видеть, что максимальное значение КПД соответствует такой нагрузке, при которой магнитные потери равны электрическим:

$$P_0 = \beta^2 \cdot P_k,$$

Отсюда значение коэффициента нагрузки, соответствующее максимальному КПД:

$$\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}},$$

Обычно КПД имеет максимальное значение при $\beta=0,4 \div 0,7$. Этот диапазон нагрузок соответствует наиболее вероятной нагрузке трансформатора. При дальнейшем увеличении нагрузки трансформатора КПД снижается, так как растут электрические потери в обмотках трансформатора $P_0 = \beta^2 \cdot P_k$.

При уменьшении $\cos \varphi_2$ КПД трансформатора снижается.

6. Уравнение намагничивающих сил и токов.

Предположим, что трансформатор работает в режиме холостого хода, т.е. вторичная обмотка разомкнута $z_H = \infty$, $I_2 = 0$. Подключим первичную обмотку трансформатора к синусоидальному напряжению \dot{U}_1 . Далее будем считать, что все электромагнитные процессы в трансформаторе изменяются синусоидально во времени. В действительности так можно считать только для ненасыщенного сердечника. Для трансформатора с насыщенным сердечником некоторые величины, характеризующие электромагнитный процесс могут быть несинусоидальными. Если все процессы происходят синусоидально, то величины, характеризующие эти процессы можно обозначать в виде комплексов. Комплексное действующее значение входного напряжения \dot{U}_1 .

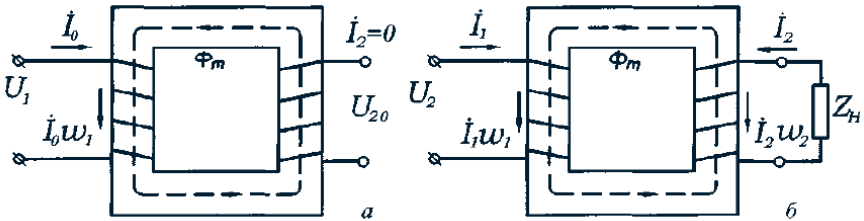


Рис. 8. Режимы холостого хода (а) и нагрузки (б) однофазного трансформатора.

Ток \dot{I}_0 в первичной обмотке при этих условиях называют *током холостого хода*. Намагничивающая сила, созданная этим током $\dot{I}_0 w_1$, по закону Ома для магнитной цепи равна:

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{\Phi} \cdot R_m,$$

где R_m — магнитное сопротивление магнитопровода:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot \mu_0 \cdot S},$$

Здесь l – длина линии магнитного поля, S – площадь, через которую замыкаются линии магнитного поля, μ и μ_0 – относительная и абсолютная магнитные проницаемости среды, через которую проходит магнитное поле, соответственно.

Эта намагничивающая сила наводит в магнитопроводе трансформатора основной магнитный поток, максимальное значение которого:

$$\Phi_m = \sqrt{2} \frac{\dot{I}_0 w_1}{R_m},$$

При замыкании вторичной обмотки на активно-индуктивную нагрузку Z_H (рис. 8 б.) в ней возникает ток \dot{I}_2 . При этом ток в первичной обмотке увеличивается до значения \dot{I}_1 .

Теперь поток Φ_m создается действием намагничивающих сил первичной $\dot{I}_1 w_1$ и вторичной $\dot{I}_2 w_2$ обмоток:

$$\Phi_m = \sqrt{2} \frac{\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2}{R_m},$$

Этот поток можно определить как (см. раздел 4):

$$\Phi_m = E_1 / (4,44 w_1 f)$$

Учитывая, что $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, получим:

$$\Phi_m = U_1 / (4,44 w_1 f),$$

Следовательно основной магнитный поток Φ_m не зависит от нагрузки трансформатора, так как напряжение U_1 во всем диапазоне нагрузки трансформатора остается неизменным. Поскольку $\Phi_m = const$ при подключении нагрузки, то

$$\sqrt{2} \frac{\dot{I}_0 w_1}{R_m} = \sqrt{2} \frac{\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2}{R_m},$$

или

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2,$$

Это уравнение намагничивающих сил трансформатора. Из этого уравнения следует, что сумма намагничивающих сил первичной $\dot{I}_1 w_1$ и вторичной $\dot{I}_2 w_2$ обмоток равна постоянной величине – намагничивающей силе холостого хода трансформатора $\dot{I}_0 w_1$.

Разделим уравнение намагничивающих сил на w_1 :

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1},$$

или

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2,$$

где \dot{I}'_2 – вторичный ток, приведённый к числу витков первичной обмотки или приведённый ток. Это уравнение токов трансформатора. Из этого уравнения следует, что первичный ток \dot{I}_1 можно рассматривать как сумму двух составляющих: одна из них (\dot{I}_0) создает основной магнитный поток, а другая составляющая ($-\dot{I}'_2$) компенсирует размагничивающее действие вторичного тока.

Таким образом, любое изменение величины тока во вторичной цепи трансформатора сопровождается соответствующим изменением первичного тока.

7. Параметры и характеристики трансформаторов.

Электрическая схема замещения позволяет с достаточной точностью исследовать свойства трансформаторов в любом режиме. Использование этой схемы для определения характеристик имеет наибольшее практическое значение для трансформаторов мощностью 50 кВ·А и выше, так как исследование таких

трансформаторов методом непосредственной нагрузки связано с некоторыми техническими трудностями: непроизводительный расход электроэнергии, необходимость в громоздких и дорогостоящих нагрузочных устройствах. Определение параметров схемы замещения возможно либо расчетным путём (в процессе расчета трансформатора), либо опытным. Приведём порядок определения параметров схемы замещения трансформатора опытным путем, сущность которого состоит в проведении двух опытов — холостого хода и короткого замыкания.

7.1. Опыт холостого хода.

Холостым ходом называется режим работы трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке. На первичную обмотку подается номинальное, т.е. расчетное напряжение. Опыт холостого хода проводится по следующей схеме (рис. 9.).

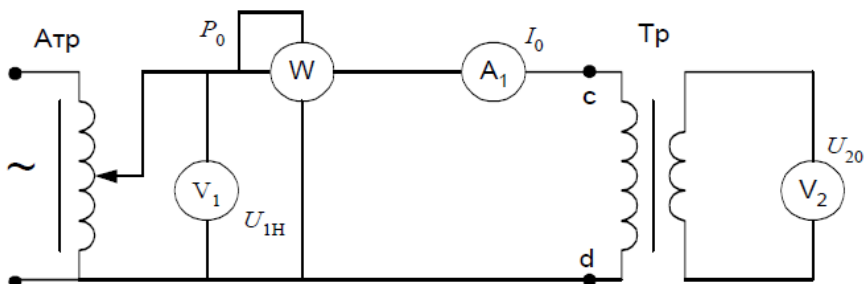


Рис. 9. Схема проведения опыта холостого хода.

Подключим первичную обмотку к сети переменного тока. Перемещением движка автотрансформатора (Атр на схеме) установим по вольтметру V_1 номинальное напряжение U_{1H} и при этом напряжении снимем показания приборов. Ваттметр W покажет активную мощность P_0 . Амперметр A_1 – ток I_0 .

Так как полезная мощность при работе трансформатора вхолостую равна нулю, то мощность на входе трансформатора в режиме холостого хода P_0 расходуется на магнитные потери в магнитопроводе P_M и электрические потери в одной лишь первичной обмотке $I_0^2 r_1$. Поскольку отсутствует нагрузка, то потребляемый трансформатором ток I_0 мал, он составляет $\sim 0,05 I_{1н}$ тока первичной обмотки при номинальной нагрузке. Следовательно, электрическими потерями $I_0^2 r_1$ первичной обмотки можно пренебречь и считать, что вся мощность холостого хода трансформатора представляет собой мощность магнитных потерь в стали магнитопровода. Поэтому магнитные потери в трансформаторе принято называть *потерями холостого хода*.

Характеристики холостого хода, представляющие собой зависимости тока I_0 , мощности P_0 и $\cos \varphi_0$ от первичного напряжения U_1 , представлены на рис. 10.

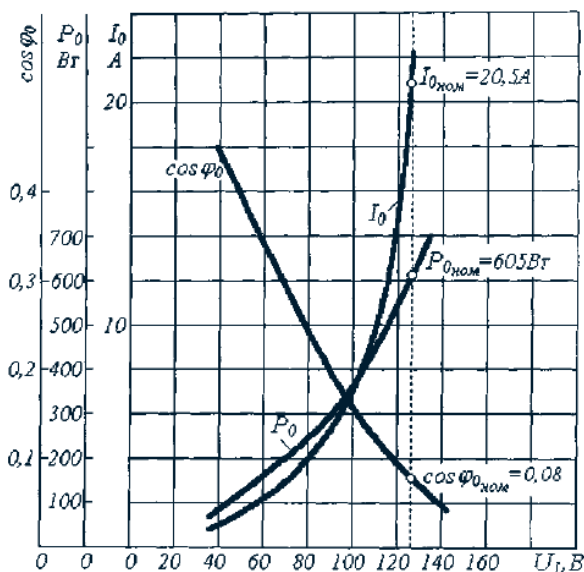


Рис. 10. Характеристики холостого хода.

По данным опыта определяют полное, активное и индуктивное сопротивление холостого хода:

$$z_0 = \frac{U_{1h}}{I_0}, \quad r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}, \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1h} I_0},$$

7.2. Опыт короткого замыкания

Необходимо различать *опыт короткого замыкания* и *режим короткого замыкания*, так как в последнем случае имеет место аварийный режим электрического трансформатора, при котором он сильно разогревается и может произойти сгорание трансформатора.

Опыт короткого замыкания – испытание электрического трансформатора при короткозамкнутой цепи вторичной обмотки и номинальном токе в первичной обмотке.

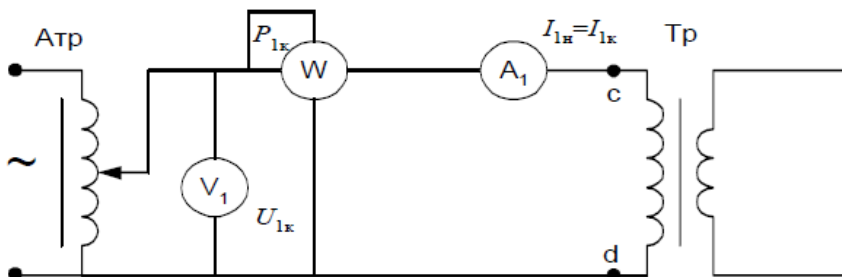


Рис. 11. Схема опыта короткого замыкания.

Опыт короткого замыкания проводится следующим образом. Движок автотрансформатора Атр ставится в положение

нулевого напряжения. Первичную обмотку автотрансформатора подключают к сети переменного тока. Плавно увеличивая напряжение перемещением движка автотрансформатора, по амперметру A_1 устанавливают номинальное значение тока короткого замыкания первичной обмотки, т. е. $I_{1н} = I_{1к}$. При этом во вторичной обмотке устанавливается номинальный ток $I_{2н}$. При данном значении тока снимают показания приборов: по ваттметру W – мощность $P_{1к}$, по вольтметру V_1 – напряжение короткого замыкания $U_{1к}$. Напряжение короткого замыкания $U_{1к}$ является важным параметром трансформатора. Оно мало и составляет примерно $0,05 U_{1н}$. Это напряжение характеризует падение напряжения внутри трансформатора.

Магнитный поток в магнитопроводе трансформатора пропорционален первичному напряжению U_1 :

$$\Phi_m = U_1 / (4,44 w_1 f),$$

но так как оно мало и составляет примерно $0,05 U_{1н}$, то такую же небольшую величину составляет магнитный поток Φ_m , поэтому величиной магнитных потерь, связанных с этим потоком, можно пренебречь. Следовательно, в опыте короткого замыкания почти вся мощность трансформатора равна мощности электрических потерь в проводах первичной и вторичной обмоток (потери в меди):

$$P_k = I_{1к}^2 \cdot r_1 + I_{2к}^2 \cdot r_2,$$

Значение этой мощности определяется по показаниям ваттметра W . $I_{1к}$ и $I_{2к}$ – токи в опыте короткого замыкания соответствующих обмоток трансформатора, определяемые по показаниям амперметров. Из этих измерений находим:

$$r_k = \frac{P_k}{I_{1н}^2}, \quad z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1н}}, \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2},$$

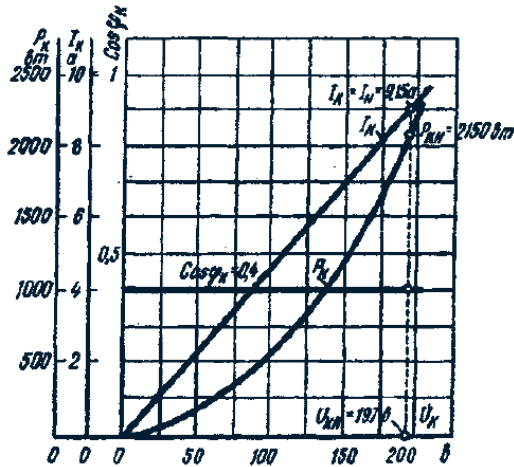


Рис. 12. Характеристики короткого замыкания.

8. Приведенный трансформатор

В общем случае параметры первичной обмотки трансформатора отличаются от параметров вторичной обмотки. Эта разница наиболее ощутима при больших коэффициентах трансформации, что затрудняет расчеты и построение векторных диаграмм, так как в этом случае векторы электрических величин первичной обмотки значительно отличаются по своей длине от одноименных векторов вторичной обмотки. Указанные затруднения устраняются приведением всех параметров трансформатора к одинаковому числу витков, обычно к числу витков первичной обмотки w_1 . С этой целью все величины, характеризующие вторичную цепь трансформатора—ЭДС, напряжение, ток и сопротивление, — пересчитывают на число витков w_1 (приводят к числу витков первичной обмотки).

Таким образом, вместо реального трансформатора с коэффициентом трансформации $k=w_1/w_2$, получают эквивалентный трансформатор с $k=w_1/w'_2$, где $w'_2=w_1$. Такой transforma-

тор называют *приведенным*. Символом «штрих» обозначаются параметры приведенного трансформатора. Однако приведение вторичных параметров трансформатора не должно отразиться на его энергетических показателях: все мощности и фазовые сдвиги во вторичной обмотке приведенного трансформатора должны остаться такими же, как и в реальном трансформаторе.

9. Электрическая схема замещения трансформатора

Электрические цепи с трансформаторами сложно рассчитывать из-за магнитной связи между обмотками. Поэтому трансформатор представляют схемой замещения, в которой магнитная связь заменяется электрической цепью. С этой целью обе обмотки «приводят» к одному числу витков, обычно к числу витков первичной обмотки. Приведенные параметры вторичной цепи обозначают буквами со штрихом.

Применение схемы замещения трансформатора предполагает, что мощности не изменяются. Мощность вторичной обмотки реального трансформатора, должна быть равна мощности вторичной обмотки приведенного трансформатора:

$$E_2 I_2 = E'_2 I'_2$$

Подставив значение приведенного вторичного тока $I'_2 = \frac{I_2}{k}$, получим формулу приведенной вторичной ЭДС:

$$E'_2 = \frac{E_2 I_2}{I'_2} = \frac{E_2 I_2}{I_2} k = E_2 k$$

Аналогично определяется приведенное напряжение вторичной обмотки:

$$U_2 I_2 = U'_2 I'_2, \text{ отсюда получаем } \boxed{U'_2 = U_2 k}$$

Из условия равенства потерь в активном сопротивлении вторичной обмотки, определим приведенное активное сопротивление вторичной обмотки:

$$I_2^2 R_2 = I_2'^2 R_2', \text{ отсюда следует } \boxed{R_2' = R_2 k^2}$$

Аналогично для реактивного и полного сопротивления:

$$\boxed{X_2' = X_2 k^2} \text{ и } \boxed{Z_2' = Z_2 k^2}$$

В электрической схеме замещения трансформатора магнитная связь между цепями заменена электрической. Схема замещения трансформатора представляет собой совокупность трех ветвей: первичной – сопротивлением $Z_1 = r_1 + j \cdot x_1$ и током \dot{I}_1 ; намагничивающей – сопротивлением $Z_0 = r_0 + j \cdot x_0$ и током \dot{I}_0 ; вторичной с двумя сопротивлениями – сопротивлением вторичной ветви $Z_2' = r_2' + j \cdot x_2'$ и сопротивлением нагрузки $Z_n' = r_n' \pm j \cdot x_n'$.

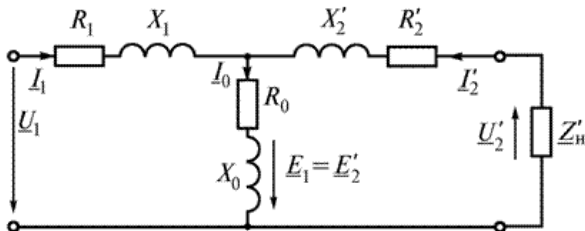


Рис. 13. Т – образная схема замещения трансформатора.

Если пренебречь током холостого хода \dot{I}_0 и удалить из схемы (рис. 13) ветвь намагничивания, то получим упрощенную схему замещения (рис. 14).

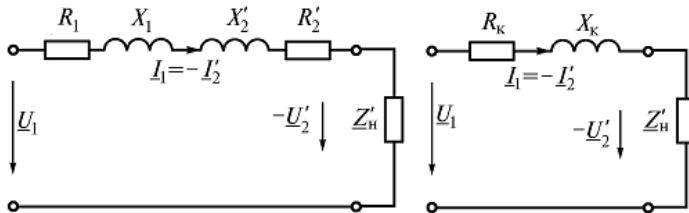


Рис. 14. Упрощённая схема замещения трансформатора.

10. Трёхфазные трансформаторы

Трансформирование трехфазной системы напряжений можно осуществить тремя однофазными трансформаторами, соединенными в трансформаторную группу (рис. 15). Однако относительная громоздкость, большой вес и повышенная стоимость являются недостатками трансформаторной группы, поэтому она применяется только в установках большой мощности с целью уменьшения веса и габаритов единицы оборудования, что важно при его монтаже и транспортировке.

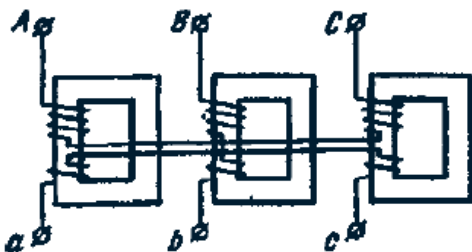


Рис. 15. Трёхфазная трансформаторная группа.

В установках мощностью примерно до 60 МВ·А обычно применяют трехфазные трансформаторы (рис. 16), у которых обмотки расположены на трех стержнях, объединенных в общий магнитопровод двумя ярами.

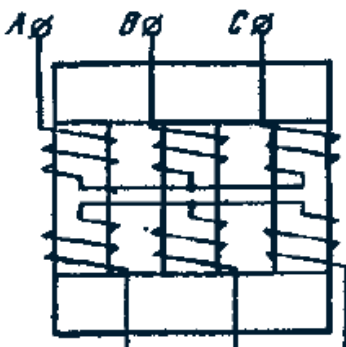


Рис. 16. Трёхфазный трансформатор.

Но полученный таким образом магнитопровод является несимметричным: магнитное сопротивление потоку средней фазы Φ_B меньше магнитного сопротивления потокам крайних фаз Φ_A и Φ_C (рис. 17).



Рис. 17. Магнитопровод трехфазного трансформатора.

Так как к первичным обмоткам трехфазного трансформатора подводится симметричная система напряжений U_A , U_B и U_C , то в магнитопроводе трансформатора возникают магнитные потоки Φ_A , Φ_B и Φ_C , образующие также симметричную систему (рис. 18).



Рис. 18. Магнитные потоки фаз А, В, С.

Однако вследствие магнитной несимметрии магнитопровода намагничивающие токи отдельных фазовых обмоток не равны: намагничивающие токи обмоток крайних фаз I_{0A} и I_{0C}

больше тока обмотки средней фазы I_{OB} . Кроме того, токи I_{OA} и I_{OC} оказываются сдвинутыми по фазе относительно соответствующих потоков Φ_A и Φ_C на угол α . Таким образом, при симметричной системе трехфазного напряжения, подведенного к трансформатору, токи холостого хода образуют несимметричную систему (рис. 19).



Рис. 19. Токи холостого хода фаз А, В, С.

Для уменьшения магнитной несимметрии трехстержневого магнитопровода, т. е. уменьшения магнитного сопротивления потокам крайних фаз сечение ярем делают на 10-15% больше сечения стержней, что уменьшает их магнитное сопротивление. Несимметрия токов холостого хода трехстержневого трансформатора практически не отражается на работе трансформатора, так как даже при небольшой нагрузке незаметно различие в величинах токов фаз.

В результате при симметричном питающем напряжении и равномерной трехфазной нагрузке все фазы трехфазного трансформатора, выполненного на трехстержневом магнитопроводе, находятся в одинаковых условиях. Поэтому рассмотренные выше уравнения ЭДС, НС и токов, а также схема замещения и векторные диаграммы могут быть использованы для исследования работы любой фазы трехфазного трансформатора.

11. Схемы обмоток трехфазных трансформаторов и группы соединения

Выводы фазных обмоток высшего напряжения обозначают буквами $A - X$, $B - Y$, $C - Z$, выводы обмоток низшего напряжения – буквами $a - x$, $b - y$, $c - z$. Каждая из обмоток может соединяться по схеме звезда или треугольник. С учетом маркировки выводов возможны 12 вариантов, которые называют **группами соединений**. Обозначение групп соединений основано на сопоставлении относительного положения векторов одноименных линейных напряжений и стрелок часов. Для этого минутная стрелка, совмещенная с вектором линейного первичного напряжения, устанавливается на 12-ти часах, а часовая стрелка совмещается с вектором линейного вторичного напряжения. Группе соединений дается название по положению часовой стрелки.

В качестве примера показаны схемы соединения обмоток, векторные диаграммы напряжений и положение одноименных векторов линейного напряжения и стрелок часов, соответствующие различным группам соединений.

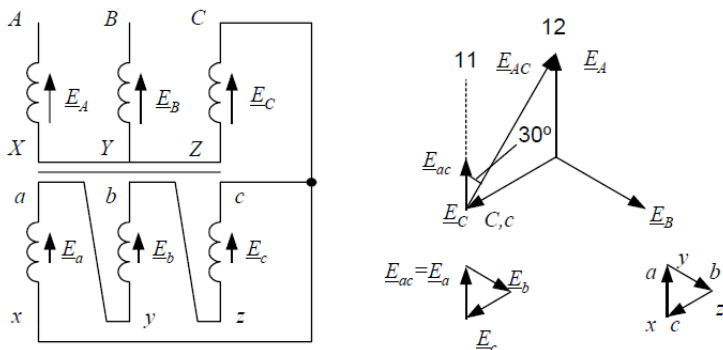


Рис. 20. Схема соединения обмоток и векторная диаграмма для группы соединения $Y/\Delta - 11$.

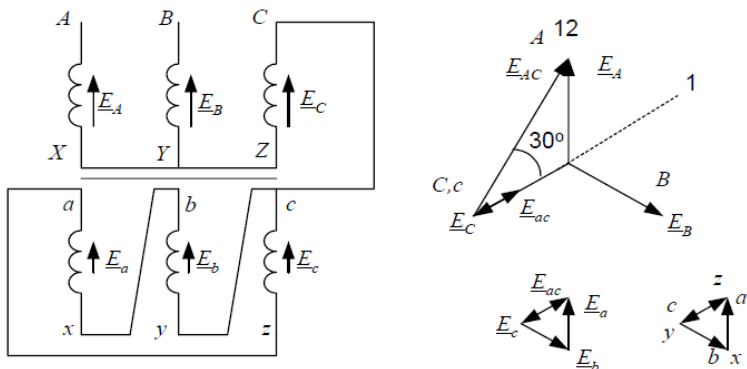


Рис. 21. Схема соединения обмоток и векторная диаграмма для группы соединения $Y/\Delta - 1$. Если изменить направление намотки вторичной обмотки на противоположное, то вектор E_{ac} повернется на 180° и группа будет $Y/\Delta - 7$.

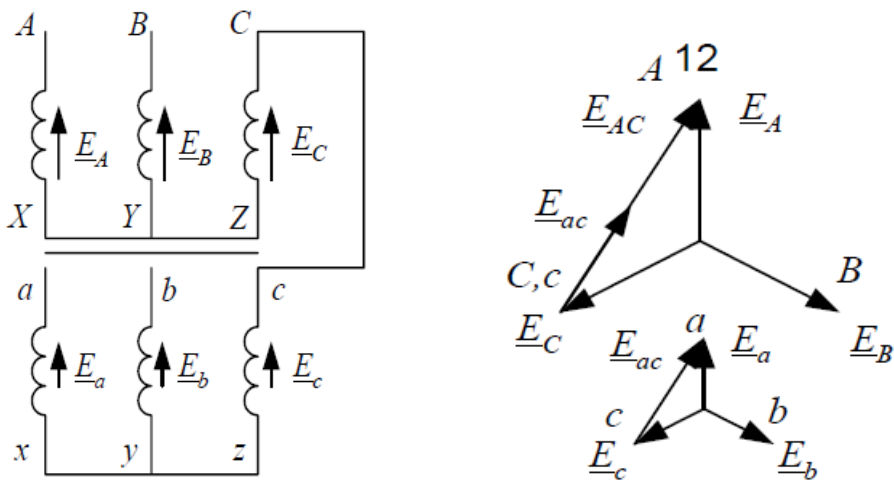


Рис. 22. Схема соединения обмоток и векторная диаграмма для группы соединения $Y/Y - 12$. Если направление намотки вторичной обмотки изменить на 180° , то вектор E_{ac} повернется на 180° и группа будет $Y/Y - 6$.

Несмотря на обилие групп, стандартом рекомендованы к применению две группы 12 и 11.

В приведенных примерах концы обмоток C , c соединены лишь для графического построения векторов линейных ЭДС E_{AC} и E_{ac} из одной точки (выравниваем потенциалы). Обмотки высшего $A - X$, $B - Y$, $C - Z$ и низшего напряжения $a - x$, $b - y$, $c - z$ электрически изолированы друг от друга.

Список литературы

1. В.Ю. Ломоносов, К.М. Поливанов, О.П. Михайлов “Электротехника” – Москва; 1990г.
2. А.С. Касаткин “Электротехника” – Москва; 1969 г.
3. А.С. Касаткин, М.В. Немцов “Электротехника” – Москва; 2003 г.
4. А.Т. Блажкин, В.А. Бесекерский, Б.В. Фролов “Общая электротехника” – Ленинград; 1979 г.
5. А.Я. Мучник, К.А. Парфёнов ”Общая электротехника” – Москва; 1965 г.
6. “Основы промышленной электроники” /Под ред. В.В.Герасимова. – М.: Высшая школа, 1986. – 572 с.
7. Т.А. Глазенко, В.А. Прянишников “Электротехника и основы электроники”. – М.: Высшая школа, 1996. –356 с.
8. В.М. Лавров “Электротехника и электроника”: Конспект лекций. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 98 с.

Учебное издание

Кулдин Николай Александрович

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Учебное пособие

Редактор

Компьютерная верстка Н. А. Кулдина

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Уч.-изд. л. 3. Усл. кр.-отг. 16.

Тираж 100 экз. Изд. №

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Типография Издательства Петрозаводского
государственного университета
185910, Петрозаводск, пр. Ленина, 33