

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ - 018

Измерение эффективности трансформаторов

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Силовые трансформаторы используются в распределительных сетях переменного тока (АС) для повышения или понижения рабочего напряжения с целью получения оптимальной эффективности передачи электроэнергии и обеспечения электрической изоляции между электрическими сетями/сегментами сети. Электрическая энергия в трансформаторе передается благодаря явлению взаимной индукции между обмотками трансформатора, когда напряжение первичной обмотки (V_p), трансформируясь, передается во вторичную обмотку (V_s) с коэффициентом, равным отношению количества витков в первичной обмотке (N_p) к количеству витков во вторичной обмотке (N_s):

$$V_s/V_p = N_s/N_p$$

Силовые трансформаторы предназначены для передачи электрической энергии от электростанции к подстанции/потребителю. Дело в том, что генерация электроэнергии является эффективной на малых уровнях напряжения, в то время как передача электроэнергии наоборот – экономична на высоких уровнях напряжения. Высокое напряжение для передачи на большие расстояния (при небольшом токе) необходимо для уменьшения омических потерь, известных как потери I^2R .

Дополнительным удобством при уменьшении омических потерь является соответствующее уменьшение поперечного сечения проводника. Однако возрастают технические сложности при работе с высоким уровнем напряжения. Но в целом, достоинства эффективной передачи электроэнергии с применением трансформаторов перекрывают недостатки, связанные со сложностью конструкции оборудования, работающего с высоким уровнем напряжения.

Так как номинальная мощность современных силовых трансформаторов находится в диапазоне МВА, то потери должны быть сведены к абсолютному минимуму. Например, потери всего в 1% для трансформатора 10МВА составят около 100кВт.

БАЗОВАЯ ТЕОРИЯ

Если одну (первичную) из двух смежных обмоток включить в сеть источника переменного тока, то по ней будет проходить переменный ток, который возбудит непрерывно меняющийся магнитный поток, откружающий данную обмотку. Этот магнитный поток, пронизывая витки второй обмотки (вторичной), индуцирует в ней эдс. При коротком замыкании или включении низкоимпедансной нагрузки в цепь вторичной обмотки, в ней будет протекать ток.

Если две обмотки связаны через воздух, т.е. расположены в непосредственной близости друг от друга, то магнитная связь будет недостаточной для эффективной передачи электроэнергии из-за большого рассеяния магнитного потока. Однако если разместить обе обмотки на стальном магнитопроводе, то можно добиться максимальной магнитной связи между обмотками и получить высокоэффективный трансформатор.

Исходя из сказанного выше, имеется 4 базовых компонента:

1. Источник переменного тока (АС)
2. Первичная обмотка
3. Стальной магнитопровод (сердечник)
4. Вторичная обмотка

Измерение эффективности трансформаторов

ИДЕАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Идеальный трансформатор не будет иметь потерь, т.е. омических потерь, потерь в магнитопроводе или потери от потоков рассеяния. Эффективность такого идеального трансформатора будет равна 100%, однако в реальности такой трансформатор не существует, благодаря факторам, описанным ниже в статье. Для проверки теоретических выводов, в статье будут использованы результаты измерений реального трансформатора, полученные с помощью высокоточного анализатора мощности ПРИЗМА.

ТИПЫ ПОТЕРЬ

ОМИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Омические потери могли бы быть полностью исключены, если бы обмотки трансформатора представляли собой чистую индуктивность. Однако, по природе, обмотки представляют собой достаточно длинный медный проводник, имеющий активное сопротивление. Напряжение, падающее на этом сопротивлении, преобразуется в мощность (потери) на нагрев проводника. Эти потери часто называются потерями I^2R , так как мощность $P = I^2R$. Так как омические потери зависят от квадрата протекающего по проводнику тока, то они представляют собой доминирующие потери во время теста трансформатора при полной нагрузке.

ВИХРЕВЫЕ ТОКИ И ПОТЕРИ НА ГИСТЕРЕЗИС

Данные потери часто называются потерями в магнитопроводе или сердечнике. При фиксированном напряжении на первичной обмотке, потери в магнитопроводе могут считаться постоянными и соответственно, являются доминирующими при тестировании трансформатора без нагрузки.

ПОТЕРИ НА РАССЕЯНИЕ

Главным образом представляют собой потери от вихревых токов в близлежащих проводящих элементах конструкции, и связанных с индуктивностью рассеяния (также называются утечкой магнитного потока). А также потери от скин-эффекта.

МАГНИТОСТРИКЦИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Физическое перемещение элементов конструкции, вызванное переменным магнитным потоком в ферромагнитных материалах, а также переменные магнитные поля, действующие на соседние обмотки и приводящие к тепловым потерям. Однако, данные потери относительно малы и обычно не рассматриваются при измерении потерь.

ВЕКТОРА

Векторный анализ часто рассматривается как что-то загадочное, однако такой анализ не является сложным, как может показаться, и представляет собой прекрасную иллюстрацию поведения силового трансформатора. Он позволяет инженеру понять, каким образом каждый тип потерь влияет на соотношение фаз, импеданс и эффективность силового трансформатора.

ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА ЯВЛЯЮТСЯ ИНДУКТИВНОСТЯМИ

Необходимо понимать, что обмотка трансформатора представляет собой индуктивность.



Рисунок 1

Как видно из Рисунка 1, напряжение АС источника V_1 это напряжение, приложенное к первичной обмотке идеального трансформатора. Также в первичной обмотке будет индуцирована эдс E_2 (с фазовым сдвигом 180°), уравнивающая напряжение АС источника V_1 .

Для индуцирования уравнивающей эдс E_2 , в первичной обмотке должен проходить ток. Причем этот ток отстает на 90° от напряжения источника V_1 (будем считать, что первичная обмотка является идеальной индуктивностью). На приведенной ниже диаграмме представлен ток I_m , как ток в первичной обмотке (вектора вращаются против часовой стрелки).

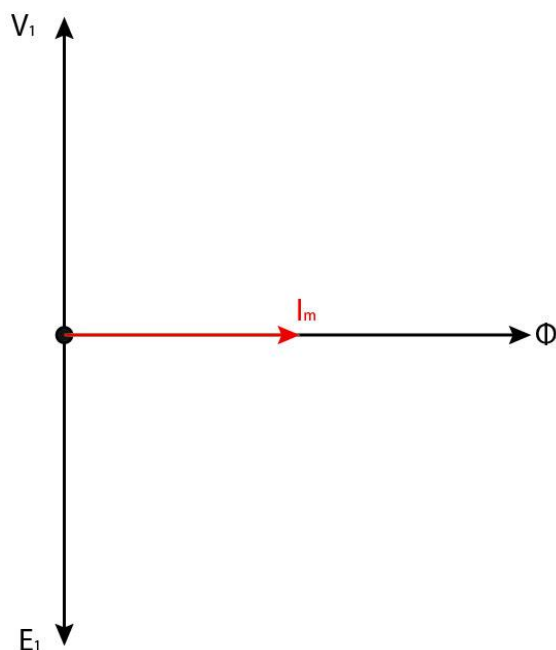


Рисунок 2

Этот также известен как намагничивающий ток, т.е. ток, обеспечивающий намагничивание первичной обмотки и создания магнитного потока в магнитопроводе трансформатора.

Фазовый сдвиг 90° тока относительно напряжения соответствует выражению:

$$V(t) = L \left(\frac{dI(t)}{dt} \right)$$

УРАВНОВЕШИВАЮЩАЯ ЭДС

Уравновешивающая эдс представляет собой «падение напряжения» на индуктивности. Таким же образом для источника выглядит любая омическая или индуктивная нагрузка. Разница между омической и индуктивной нагрузкой заключается в том, что во втором случае уравновешивающая эдс не совпадает по фазе с током.

Как видно из рисунка, мгновенное напряжение на индуктивности во времени прямо пропорционально изменениям тока.

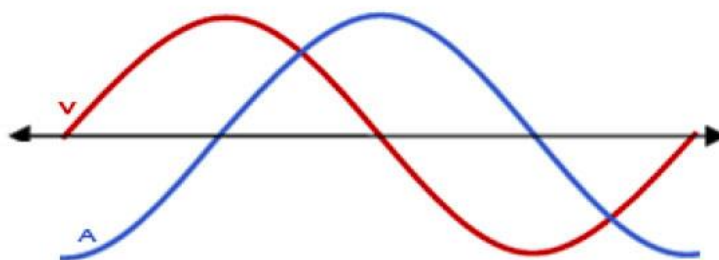


Рисунок 3

Объясняется это так, что в 0 градусов по периоду тока, значение производной тока по времени dI/dt максимально (т.е. максимальное изменение тока во времени). Если в этот момент напряжение находится в максимуме по своему значению, то считается, что оно опережает ток на 90° . Т.е. ток отстает от напряжения на 90° .

Этот ток необходим для поддержания уравновешивающей эдс (или падения напряжения на индуктивности или обмотке) и не потребляется в виде активной мощности (Вт). Когда сигнал источника (переменный сигнал сети питания) меняет свою полярность, меняет полярность и уравновешивающая эдс. Таким образом, общая потребляемая мощность равна 0, т.е. происходит обмен реактивной мощностью между источником и потребителем (индуктивностью/обмоткой).

Так как фазовый угол между напряжением и током составляет 90° , то коэффициент мощности равен нулю.

$$\cos \theta = \cos 90 = 0$$

$$Вт = V_{скз} \cdot I_{скз} \cdot PF$$

И только в случае присутствия омического компонента, указанная мощность будет рассеиваться в обмотке. А любая мощность, рассеиваемая при разомкнутой вторичной обмотке, считается как потери в магнитопроводе или сердечнике.

ЧТО ЕСТЬ НУЛЕВОЙ КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ

Из определения нулевого коэффициента мощности можно сделать вывод, что полезная мощность не передается, так как фазовый угол между напряжением и током составляет 90° , и соответственно $V_{\text{скз.}} \times A_{\text{скз.}} \times \text{PF} = 0$.

Однако также необходимо понимать, что происходит с током при нулевом коэффициенте мощности. Здесь поможет простое определение разницы между реактивной и полной мощностью. Реактивная мощность имеет нулевой результирующий вклад по передаче полезной мощности. За полный период (360°) передача полезной мощности равна нулю. При этом важно понимать, что ток в цепи протекает.

Если рассмотреть ток в индуктивности, то во время положительной половины периода, ток «протекает по направлению к катушке индуктивности». А во время отрицательной половины периода, ток «возвращается к источнику». Если бы индуктивность была идеальной, что на практике невозможно, в связи с наличием конечного сопротивления провода из которого сделана катушка индуктивности, результирующий эффект по передаче мощности был бы равен нулю.

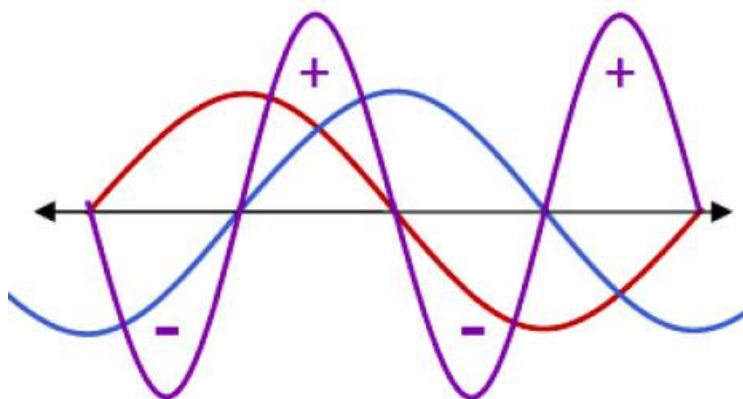


Рисунок 4

ПЕРЕМЕННЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Ток намагничивания в первичной обмотке (отстает от напряжения источника на 90°) возбуждает переменный магнитный поток в магнитопроводе (сердечнике). Этот магнитный поток пропорционален и синфазен току в первичной обмотке. Таким образом, и намагничивающий ток в первичной обмотке и переменный магнитный поток, отстают от напряжения источника питания на 90° . Так как переменный магнитный поток замыкается по магнитопроводу (сердечнику), то он также индуцирует эдс во вторичной обмотке трансформатора (т.н. взаимно индуцированная эдс).

Как видно из фазовой диаграммы на Рисунке 5, ток в первичной обмотке I_m синфазен с переменным магнитным потоком Φ . Первичная и вторичная обмотки помещены на общий стальной магнитопровод. Во вторичной обмотке индуцируется эдс E_2 . Эдс E_2 во вторичной обмотке синфазна с эдс E_1 в первичной обмотке, находится в противофазе (180°) с напряжением источника АС, подключенного к первичной обмотке, и отстает на 90° от переменного магнитного потока в магнитопроводе (сердечнике). Напряжение на разомкнутой вторичной обмотке V_2 синфазно с эдс E_2 . Ток во вторичной обмотке отсутствует.

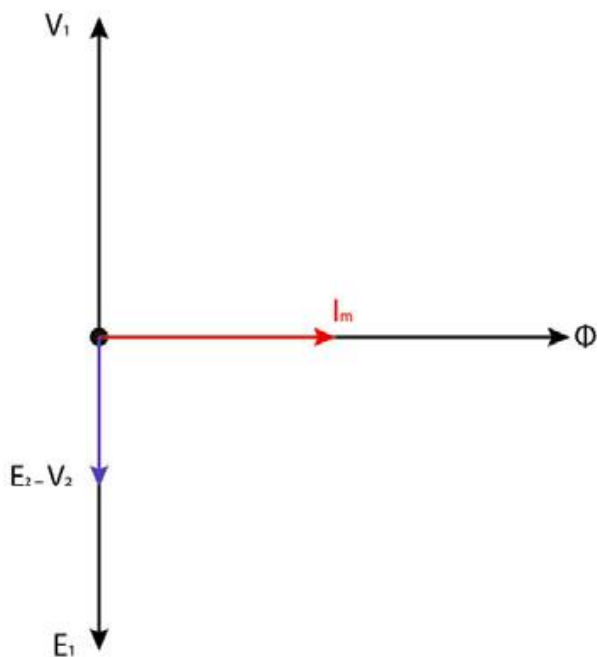


Рисунок 5

ПОТЕРИ В МАГНИТОПРОВОДЕ (СЕРДЕЧНИКЕ)

Потери в магнитопроводе (сердечнике) трансформатора обусловлены гистерезисом и вихревыми токами. Поэтому от АС источника, подключенного к первичной обмотке, требуется мощность для возбуждения магнитного потока и мощность на покрытие потерь, обусловленных гистерезисом и вихревыми токами в магнитопроводе (сердечнике).

Из-за потерь на возбуждение магнитопровода, фазовый угол между напряжением и током в первичной обмотке уже не равен 90° (как это могло быть в идеальном трансформаторе), так как компонент потерь на возбуждение магнитопровода фактически является синфазными и омическим по характеру по отношению к напряжению в первичной обмотке.

Так как ток потерь в магнитопроводе синфазен с напряжением в первичной обмотке, то он немного «подтягивает» вектор тока в первичной обмотке к вектору напряжения в первичной обмотке. Поэтому угол между напряжением и током в первичной обмотке немного меньше 90° , а не равен 90° , как должно быть в идеальной индуктивности.

При холостом ходе трансформатора (без нагрузки), ток I_0 в первичной обмотке может быть выражен следующим образом:

$$\overline{I_0} = \overline{I_m} + \overline{I_w}$$

$$I_m = I_0 \cdot \sin \theta$$

$$I_w = I_0 \cdot \cos \theta$$

$$I_0 = \sqrt{I_m^2 + I_w^2}$$

Где I_0 – ток в первичной обмотке, I_m – ток намагничивания, I_w – ток потерь в магнитопроводе

Измерение эффективности трансформаторов

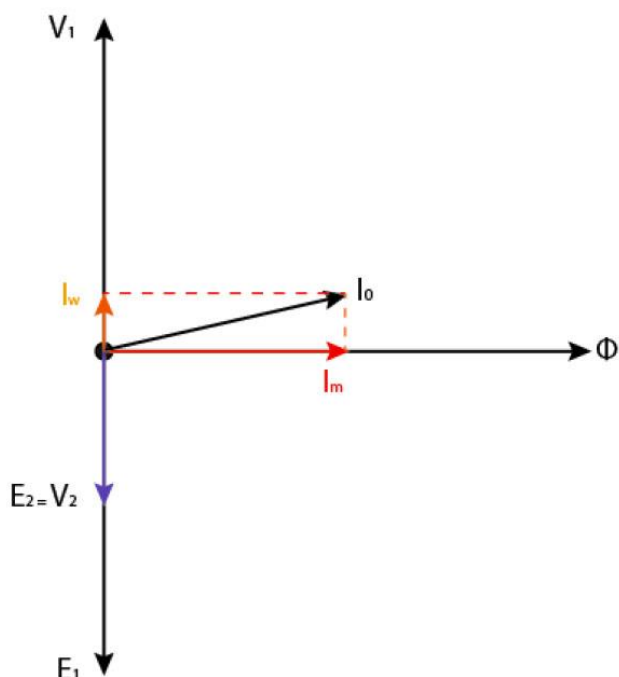


Рисунок 6

Как видно из векторной диаграммы, ток I_m значительно больше тока I_w . Ток I_w должен быть малым на сколько возможно, так как его значение соответствует мощности потерь в магнитопроводе (сердечнике) и чем меньше его значение, тем ближе фазовый угол между напряжением и током в первичной обмотке к 90° в режиме холостого хода трансформатора.

Потери в магнитопроводе трансформатора выражаются следующим образом:

$$\text{Общие потери в магнитопроводе (Вт)} = V_1 \times I_0 \times \cos\theta$$

Пример:

Трансформатор 2400В/400В в режиме холостого хода имеет ток в первичной обмотке 1А и потери в магнитопроводе 500Вт.

Необходимо определить:

- Коэффициент мощности в первичной обмотке
- Ток потерь в магнитопроводе I_w
- Ток намагничивания I_m

Расчет:

$$V_1 = 2400\text{В}, V_2 = 400\text{В}, I_0 = 1\text{А}, \text{потери} = 400\text{Вт}$$

$$\text{Потери в магнитопроводе} = 400\text{Вт} = V_1 \times I_0 \times \cos\theta$$

$$400 = 2400 \times 1 \times \cos\theta$$

$$400/2400 = \cos\theta$$

$$0.1667 = \cos\theta = \text{коэффициент мощности}$$

$$\theta = 80.41^\circ$$

$$\text{Ток намагничивания} = I_m = I_0 \times \sin\theta = 1 \times \sin(80.41) = 0.986\text{А}$$

$$\text{Ток потерь в магнитопроводе} = I_w = I_0 \times \cos\theta = 1 \times \cos(80.41) = 0.1667\text{А}$$

ФАЗОВЫЙ УГОЛ ПРИ РАБОТЕ ТРАНСФОРМАТОРА НА НАГРУЗКУ

При подключении трансформатора к нагрузке, изменяется не только фазовый угол между током и напряжением первичной обмотке, но также и амплитуда тока в первичной обмотке.

Для примера рассмотрим подключение ко вторичной обмотке трансформатора нагрузки с небольшой индуктивностью и посмотрим на ее влияние на коэффициент мощности в первичной обмотке трансформатора. Ток I_2 , проходящий во вторичной обмотке при нагрузке трансформатора, создает свой магнитный поток, который стремится уменьшить магнитный поток в сердечнике. Однако уменьшение потока в сердечнике вызывает уменьшение эдс E_1 . Но чтобы результирующий поток в сердечнике оставался неизменным, встречный поток вторичной обмотки должен быть уравновешен магнитным потоком первичной обмотки, что и ведет к увеличению тока в первичной обмотке I'_1 (уравновешивающий ток). Необходимо помнить, что результирующий магнитный поток в сердечнике трансформатора остается неизменным.

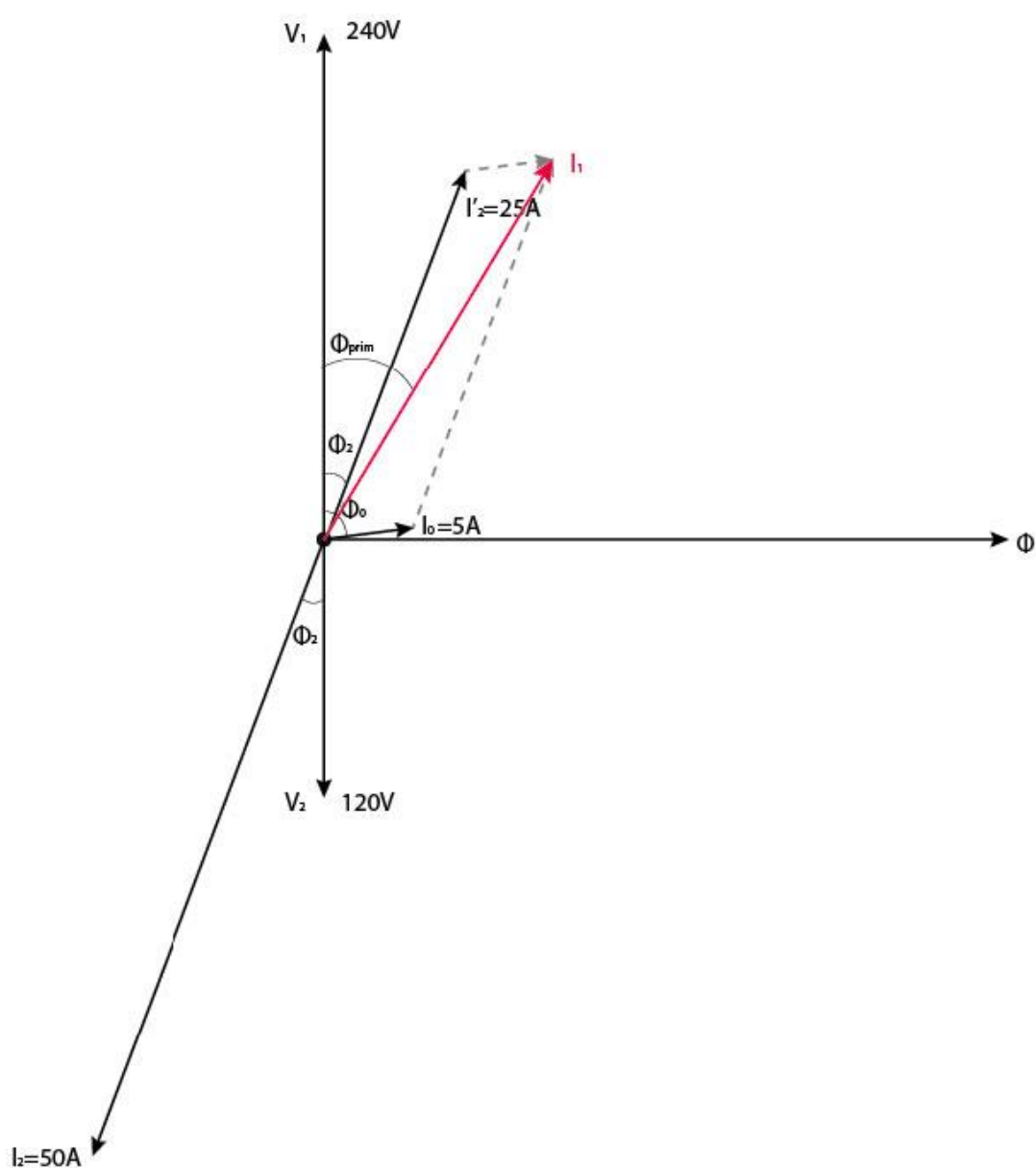


Рисунок 7. $\Phi_0 = 85^\circ$, $\Phi_2 = 14.06^\circ$

Пример:

Понижающий 2:1 трансформатор подключен к источнику АС напряжения 240В_{скз.}, в режиме холостого хода ток в первичной обмотке равен 5А, коэффициент мощности 0.087. При подключении нагрузки 2.4Ом, результирующий коэффициент мощности во вторичной обмотке составляет 0.97. Теперь можно рассчитать ожидаемый коэффициент мощности в первичной обмотке и ток в первичной обмотке (в режиме работы с нагрузкой).

Расчет напряжения во вторичной обмотке:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$\frac{2}{1} = \frac{240}{V_s}$$

$$V_s = 120 \text{ В}_{\text{скз.}}$$

Ток во вторичной обмотке:

$$I_2 = \frac{V}{R} = 50 \text{ А}_{\text{скз.}}$$

Фазовый угол тока во вторичной обмотке:

$$\cos^{-1} 0.97 = 14.06^\circ$$

Так как в примере рассматривается понижающий трансформатор, то значение тока в первичной обмотке получается из выражения:

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{V_s}{V_p}$$

$$\frac{I_p}{50} = \frac{120}{240}$$

$$I_p = \left(\frac{120}{240}\right) \times 50 = 25 \text{ А}_{\text{скз.}}$$

Мдс первичной обмотки равна по значению и направлена встречно мдс вторичной обмотки, поэтому ток в первичной обмотке уравнивает размагничивающее действие тока вторичной обмотки и поддерживает магнитный поток в сердечнике неизменным. Так как векторная величина мдс зависит от векторов тока и напряжения, то фазовый угол между напряжением V_1 и током I_1 первичной обмотки равен фазовому углу между напряжением V_2 и током I_2 вторичной обмотки.

Отсюда можно сделать вывод, что ток первичной обмотки (уравнивающий ток) имеет амплитуду 25А_{скз.} и фазовый угол 14.06° (отстает от напряжения).

Теперь для расчета коэффициента мощности первичной обмотки и суммарного тока в первичной обмотке необходимо векторно (с помощью синфазных и квадратурных компонент) сложить уравнивающий ток и ток холостого хода I_0 .

$$I_0 = 5A \angle 5 \text{ градусов}$$

$$\text{Вертикальная составляющая} = 5 \times \sin 5^\circ = 0.436$$

$$\text{Горизонтальная составляющая} = 5 \times \cos 5^\circ = 4.981$$

$$I'_2 = 25A \angle (90^\circ - 14.06^\circ) \text{ градусов}$$

$$\text{Вертикальная составляющая} = 25 \times \sin 75.94^\circ = 24.251$$

$$\text{Горизонтальная составляющая} = 25 \times \cos 75.94^\circ = 6.073$$

Теперь для расчета тока в первичной обмотке, используем теорему Пифагора:

$$I_1 = \sqrt{(0.436 + 24.251)^2 + (4.981 + 6.073)^2}$$

$$I_1 = \sqrt{24.687^2 + 11.054^2}$$

$$I_1 = 27.049 A_{\text{скз.}}$$

Результирующий фазовый угол:

$$\tan \Phi_{\text{prim}} = \frac{24.687}{11.054}$$

$$\Phi_{\text{prim}} = 65.879$$

Для получения значения угла относительно напряжения V_1 , необходимо:

$$\Phi_{\text{prim}} = 90^\circ - 65.879^\circ = 24.121^\circ$$

Если вспомнить, то фазовый угол между напряжением и током во вторичной обмотке был около 14° . Уравновешивающий ток первичной обмотки имеет фазовый сдвиг 180° относительно тока во вторичной обмотке, а результирующий ток в первичной обмотке (по амплитуде и фазе) является векторной суммой токов на намагничивание сердечника (при работе без нагрузки) и потерь в магнитопроводе (сердечнике).

Некорректно считать, что импеданс со стороны первичной обмотке является зеркальным импедансу со стороны вторичной обмотки трансформатора. Потери в первичной обмотке и намагничивающий ток должны быть известны заранее, чтобы их можно было вычесть из фазовых и амплитудных значений, полученных при работе трансформатора на нагрузку.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОЭФФ. МОЩНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА
 С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗАТОРА ПРИЗМА-550

В примере тестируется изолирующий 1:1 трансформатор. Измерения проводятся в режимах холостого хода и с нагрузкой. Тест с коротким замыканием вторичной обмотки не проводится.

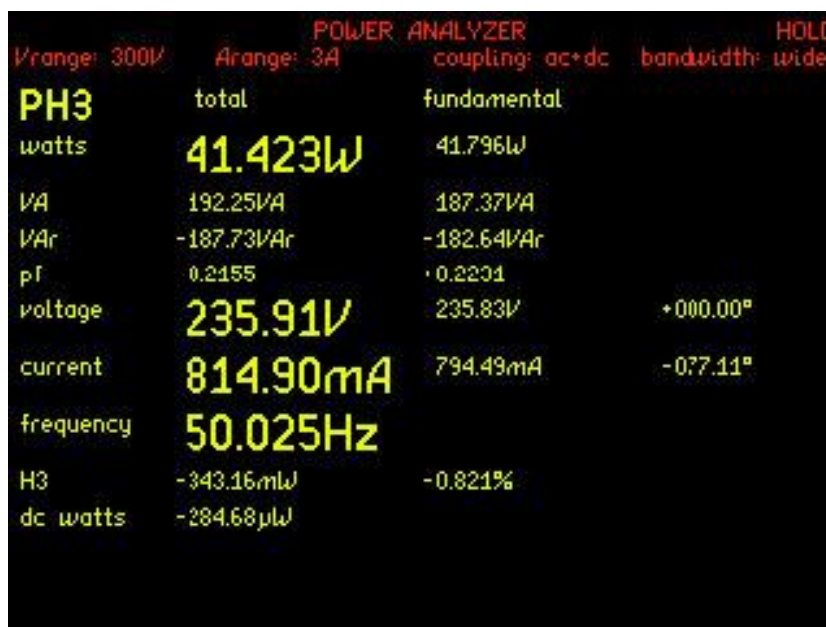


Рисунок 8

При подключении к напряжению сети 235.83В (основная частота 50.025Гц) и при потреблении 41.796Вт, фазовый угол (между напряжением V_1 и I_0) в режиме холостого хода составляет -77.11° . Расчетный импеданс на основной частоте 50.025Гц равен: $235.83\text{В} / 794.49\text{мА} = 296.83\text{Ом}$

Это подтверждается результатами измерения в режиме анализа импеданса (на основной частоте):

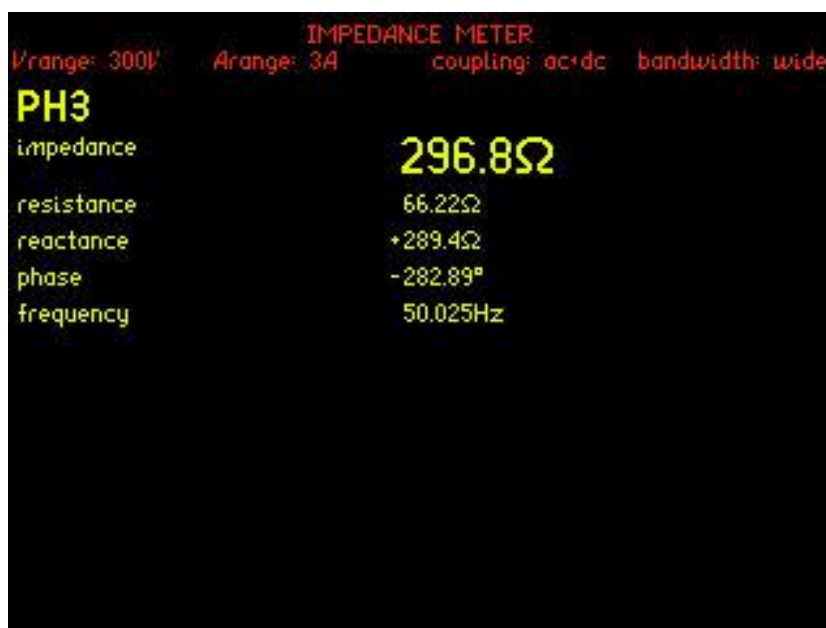


Рисунок 9

Анализаторы ПРИЗМА не используют векторных диаграмм, так как выбор сделан в пользу высокого разрешения выводимых на дисплей результатов измерений. Но для наглядности (если нет опыта работы с числовым представлением данных на дисплее анализаторов серии ПРИЗМА) построим векторные диаграммы.

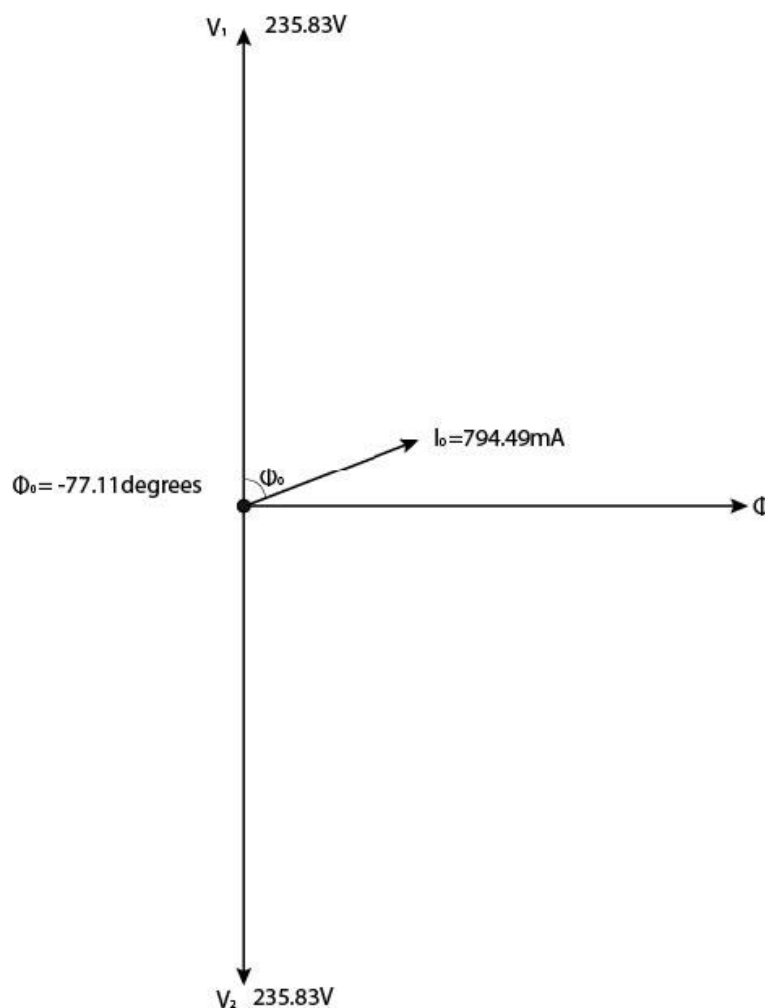


Рисунок 10

Из Рисунка 10 видно, что V_1 это напряжение питания от сети, I_0 – ток холостого хода первичной обмотки, состоящий из тока на намагничивание сердечника трансформатора и тока потерь в магнитопроводе.

Таким образом, потери можно рассчитать, зная напряжение первичной обмотки, амплитуду тока холостого хода первичной обмотки и фазовый угол между векторами этих величин. Используя тригонометрию, рассчитывается синфазная с напряжением обмотки составляющая тока холостого хода (потери), умножается на величину этого напряжения и в результате получается мощность потерь в Вт. Все эти вычисления производятся анализатором ПРИЗМА-550 автоматически.

Мощность потерь зависит от синфазной с напряжением составляющей тока первичной обмотки в режиме холостого хода трансформатора, и так как эта мощность является «активной», то она относится к тепловым потерям.

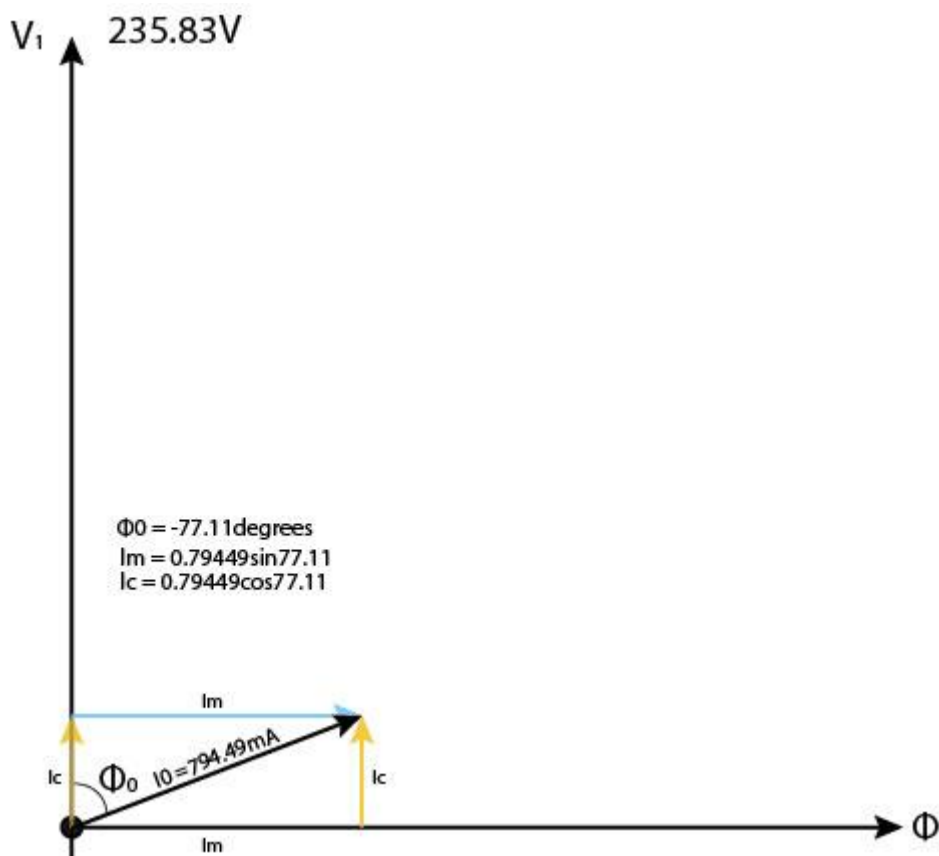


Рисунок 11

Таким образом, чем больше потери в магнитопроводе, обусловленных гистерезисом и вихревыми токами, тем больше синфазная с напряжением V_1 составляющая тока.

Ток намагничивания:

$$I_m = 0.79449 \times \sin 77.11$$

$$I_m = 0.774A$$

Ток потерь в магнитопроводе:

$$I_c = 0.79449 \times \cos 77.11$$

$$I_c = 0.177A$$

Если теперь умножить синфазную составляющую I_c на напряжение основной частоты, то получим мощность (потери):

$$\text{Потери (Вт)} = V \times I_m$$

$$\text{Потери} = 235.83 \times 0.177 = 41.74 \text{ Вт}$$

Хотя присутствует небольшая ошибка округления, результат вычисления полностью соответствует данным, полученным опытным путем с помощью анализатора ПРИЗМА-550, см. рисунок 8 (строка «watts» на основной частоте).

АНАЛИЗ ГАРМОНИК

Анализатор ПРИЗМА-550 оснащен режимом анализа гармоник. Как видно из рисунков 12 и 13, напряжение в первичной обмотке имеет небольшие искажения, тогда как ток имеет значительные искажения.

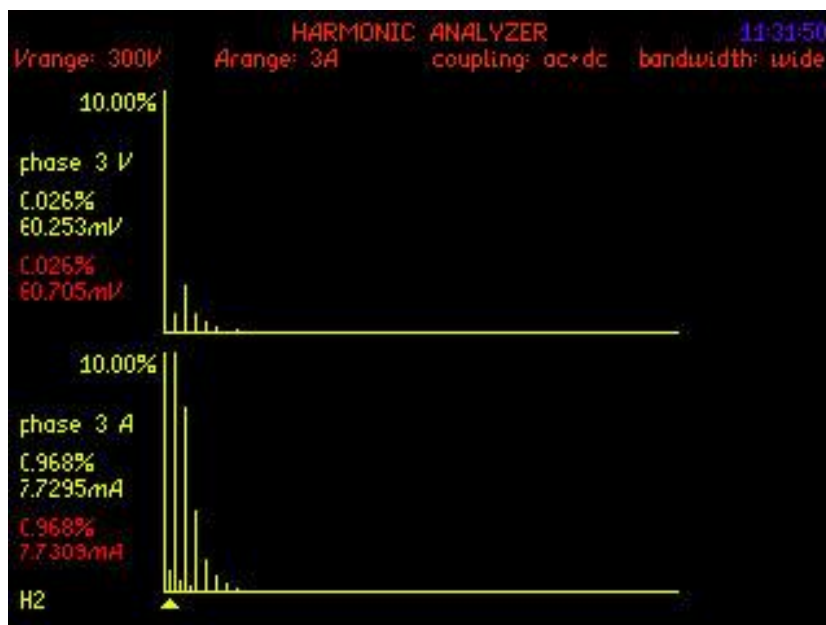


Рисунок 12

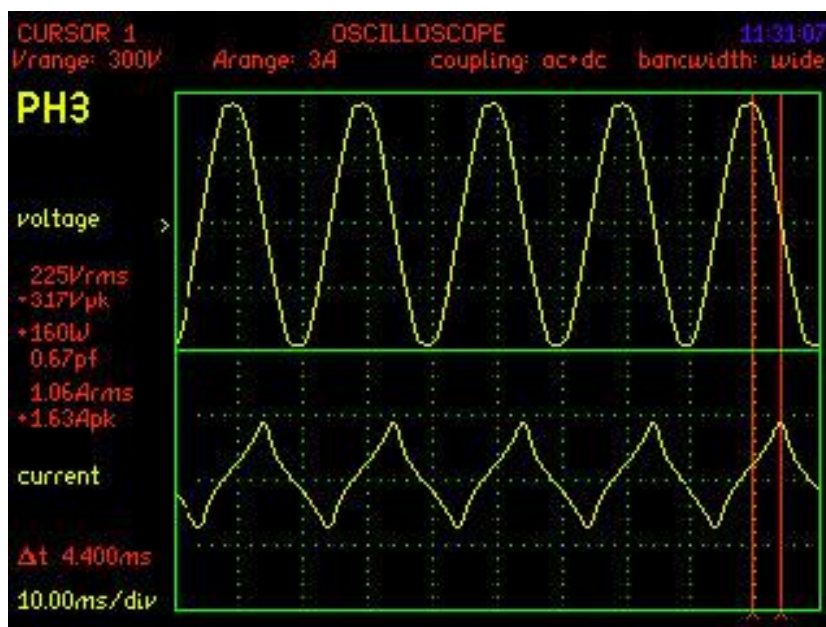


Рисунок 13

Форма сигнала тока значительно искажена, и имеет почти треугольную форму. Это говорит о невысоком качестве изготовления сердечника трансформатора. Также с помощью режима измерительных курсоров можно измерить временной сдвиг (Δt) между сигналом тока и напряжения, который составляет 4.400мс, что соответствует фазовому углу 11.09° .

ТЕСТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ПОДКЛЮЧЕННОЙ НАГРУЗКЕ

Как было показано на Рисунке 7, параметры напряжение-ток во вторичной обмотке «отражаются» с фазовым сдвигом 180° на параметры напряжение-ток в первичной обмотке (с учетом потерь в магнитопроводе).

В рассматриваемом примере, резистивный нагреватель воздуха подключается к вторичной обмотке трансформатора. Такой тип нагрузки имеет коэффициент мощности близкий к 1. Таким образом, в первичной обмотке вектор тока будет также «подтянут» к вектору напряжения сети.



Рисунок 14. Измерение параметров при подключении к первичной обмотке

По результатам измерения видно, что мощность составляет 1.4868кВт, ток 6.5169А и коэффициент мощности 0.9811 (соответствует фазовому углу -11.09°).

Необходимо отметить, что в данном примере не проводить тест на полную мощность трансформатора, так как исследуемый трансформатор имеет мощность 1.5кВА, а измерение проводится при 1.4868кВА.

Для того чтобы построить результирующую векторную диаграмму напряжений и токов, необходимо провести измерение со стороны вторичной обмотки. После проведения измерений, можно проверить теорию, т.е. убедиться, что импеданс, ток, и фазовый угол по отношению к напряжению во вторичной обмотке «отражается» со сдвигом фазы на 180° на первичную обмотку трансформатора. Также можно убедиться во влиянии тока во вторичной обмотке на фазовый угол тока в первичной обмотке и на коэффициент мощности в первичной обмотке.

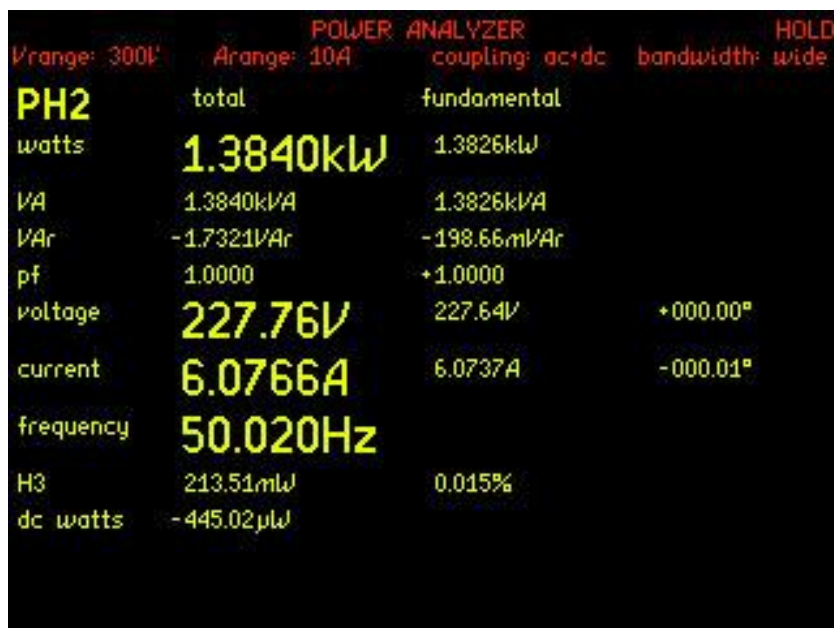


Рисунок 15. Измерение параметров при подключении к вторичной обмотке

Следует обратить внимание на разницу напряжений в первичной (232.61В) и вторичной обмотках (227.76В). Такая разница появилась из-за падения напряжения со стороны вторичной обмотки благодаря омическому сопротивлению обмотки и утечке индуктивности обмоток трансформатора. Для простоты на диаграмме не приводятся вектора импедансов обмоток, но они всегда должны приниматься во внимание.

Следующие выражения описывают связь между входным напряжением V_1 и выходным напряжением V_2 .

$$V_1 = E_1 + I_1 \times R_1$$

$$V_2 = E_2 - I_2 \times R_2$$

На приведенной ниже векторной диаграмме виден эффект присутствия нагрузки на вторичной обмотке трансформатора и ее влияние на ток и его фазовый угол (или коэфф. мощности) в первичной обмотке. Ток в первичной обмотке состоит из тока намагничивания и тока потерь в магнитопроводе и омических потерь.

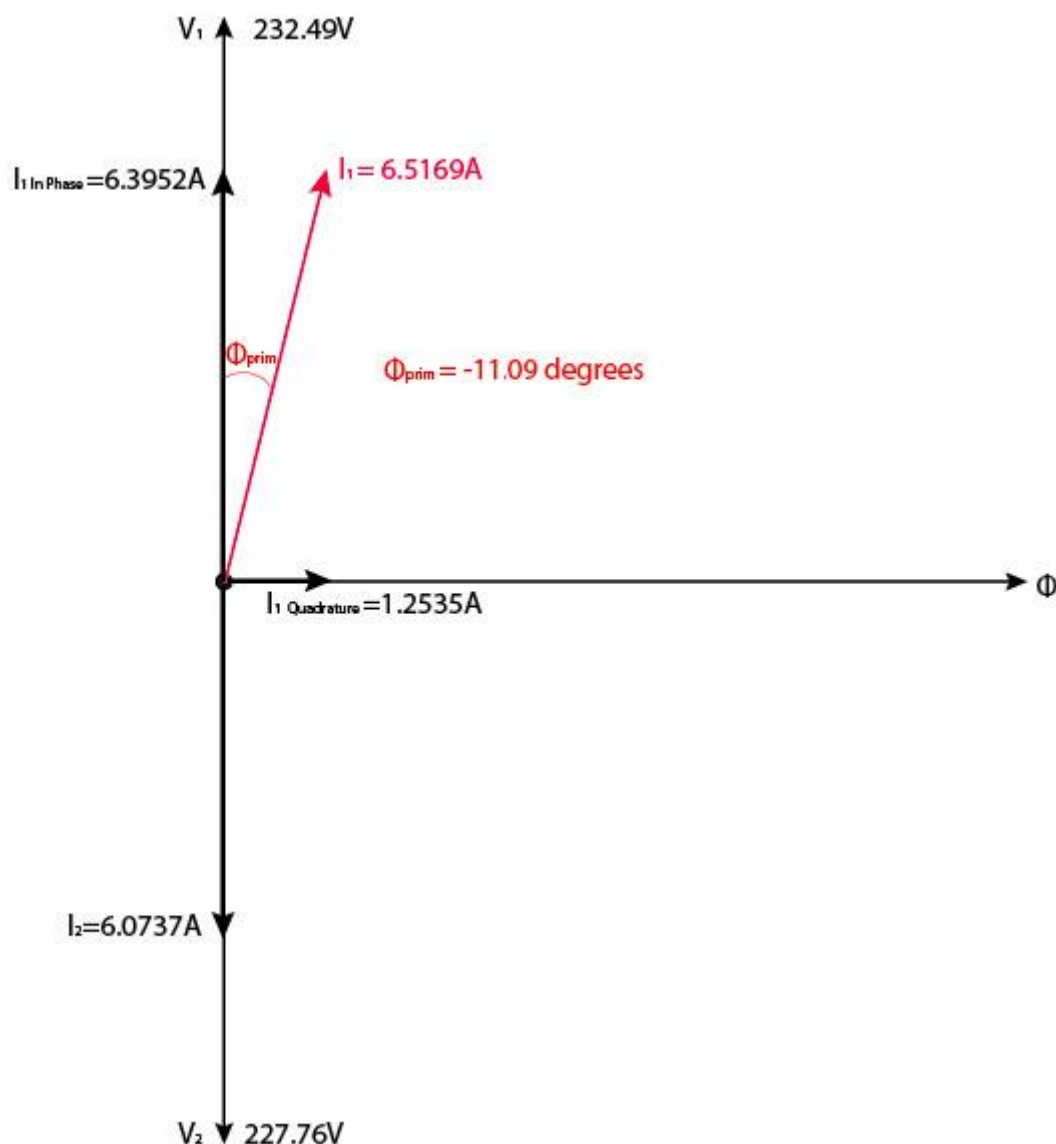


Рисунок 16

ТЕСТИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

ПОДГОТОВКА К ИЗМЕРЕНИЮ

Для тестирования 3-фазных трансформаторов применяется 2 анализатора ПРИЗМА-530 в режиме «ведущий-ведомый» для 6-фазного анализа. В данном примере измерялись параметры 1-фазного трансформатора. Режим температуры нагревателя был выбран максимальным.



НАСТРОЙКА АНАЛИЗАТОРА

Параметр «Эффективность» выбирается в меню «Анализатор мощности» при выборе настройки «фаза/следующая фаза». Вход трансформатора подключается к фазовому входу 2 анализатора (Phase 2), а выход трансформатора к фазовому входу 3 анализатора (Phase 3). Фазовый вход 1 в данном испытании не использовался, но есть возможность использовать любую комбинацию входов анализатора ПРИЗМА.

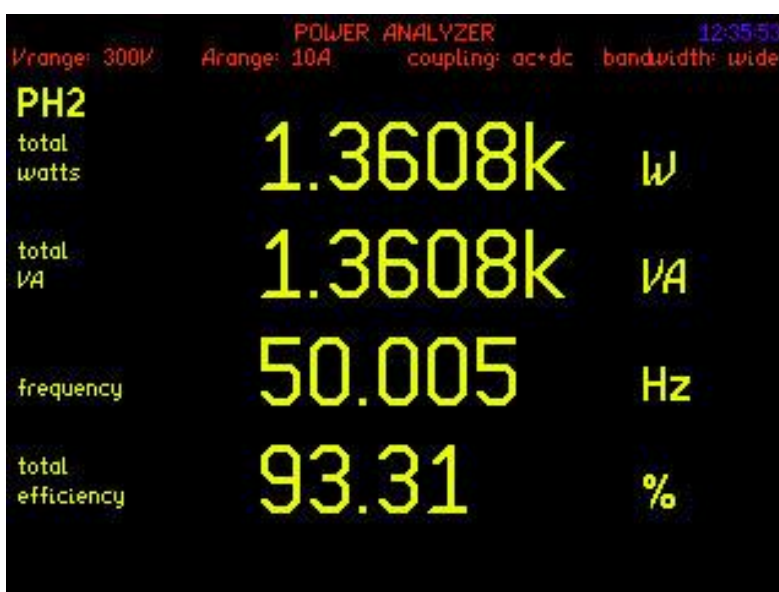


Рисунок 17. Эффективность трансформатора 93.31%



Newtons4th Ltd
office@n4l.ru; office@newtons4th.com
www.n4l.ru; www.newtons4th.com

Анализаторы серии ПРИЗМА-550 обеспечивают превосходную точность измерения фазы 0.005° , что позволяет проводить измерения потерь в магнитопроводе (сердечнике) трансформатора при крайне низких значениях коэффициента мощности (т.е. при работе трансформатора в режиме холостого хода).

Дополнительную информацию по прецизионным анализаторам мощности серии ПРИЗМА вы можете найти на сайтах www.n4l.ru, www.newtons4th.com