

Лабораторная работа № 7

Исследование эксплуатационных характеристик трансформатора

Цель работы: исследовать влияние величины и характера нагрузки на выходное напряжение и **к.п.д.** трансформатора

1. Общие теоретические положения

Важными эксплуатационными характеристиками трансформаторов являются зависимости выходного напряжения и **к.п.д.** от величины и характера нагрузки.

Характеристики, которые показывают, каким образом изменяется выходное напряжение при изменении величины и характера нагрузки, называются *внешними*. Общее выражение внешних характеристик можно получить на основании упрощенной схемы замещения и соответствующей векторной диаграммы трансформатора (рис. 1).

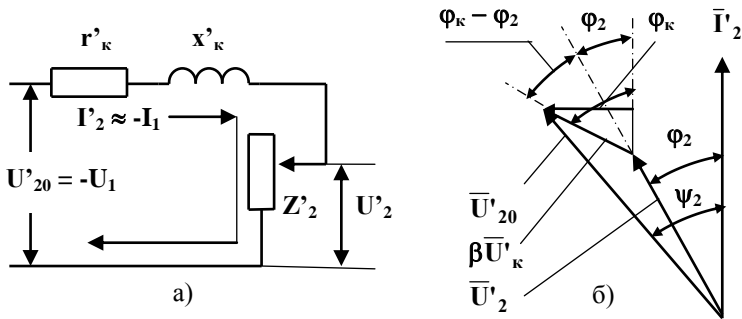


Рис. 1. Упрощенная схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) трансформатора

Точное выражение внешней характеристики, записанное в относительных единицах, имеет следующий вид:

$$U^*_2 = \sqrt{1 - (\beta u_k)^2 \sin^2(\varphi_k - \varphi_2)} - \beta u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2), \quad (1)$$

где: $U^*_2 = U_2 / U_{20}$ – относительное значение выходного напряжения; U_{20}, U_2 – вторичные напряжения в режимах холостого хода и нагрузки; $\beta = I'^2_2 / I'^2_{2ном} \approx I_1 / I_{1ном}$ – коэффициент нагрузки, характеризующий модуль тока; $u_k = \sqrt{u_{к.а.}^2 + u_{к.г.}^2}$ – паспортное значение напряжения короткого замыкания в относительных единицах; φ_k, φ_2 – фазовые углы короткого замыкания трансформатора и нагрузки.

Это уравнение справедливо для трансформаторов с любыми напряжениями короткого замыкания и во всем диапазоне изменения тока нагрузки вплоть до короткого замыкания. На практике ток нагрузки обычно не превышает $2I_{ном}$, и в основном рабочем диапазоне $\beta u_k < 0,1$. В этом случае достаточно высокую точность дают приближенные формулы:

$$U^*_2 = 1 - \beta(u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кг} \sin \varphi_2) - \frac{\beta^2(u_{кг} \cos \varphi_2 - u_{ка} \sin \varphi_2)^2}{2}; \quad (2)$$

$$U^*_2 \approx 1 - \beta(u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кг} \sin \varphi_2), \quad (3)$$

где $u_{ка} = u_k \cos \varphi_k$; $u_{кг} = u_k \sin \varphi_k$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания в относительных единицах

Из формул (1) – (3) следует, что на выходное напряжение существенное влияние оказывает не только величина, но и характер нагрузки. Поскольку косинус является четной функцией, независимо от знака угла φ_2 активная составляющая напряжения короткого замыкания $u_{ка}$ всегда вызывает уменьшение выходного напряжения. Принципиально по-иному проявляется влияние реактивной составляющей $u_{кг}$. Если $\varphi_2 > 0$ (индуктивный характер нагрузки), имеем положительное отклонение: $\beta u_{кг} \sin \varphi_2 > 0$ и дополнительное уменьшение выходного напряжения. При $\varphi_2 < 0$ (емкостный характер нагрузки) реактивная составляющая напряжения короткого замыкания вызывает отрицательное отклонение: $\beta u_{кг} \sin \varphi_2 < 0$ и, следовательно, определенное увеличение выходного напряжения по сравнению с активной нагрузкой. При выполнении условий:

$$\varphi_2 < 0; \quad u_{ка} \cos \varphi_2 - u_{кг} \sin \varphi_2 = 0$$

напряжение на выходе трансформатора в пределах рабочего диапазона остается практически неизменным. Типичный вид зависимостей $U_2 = f(I_2, \beta)$ при различном характере нагрузки показан на рис. 2.

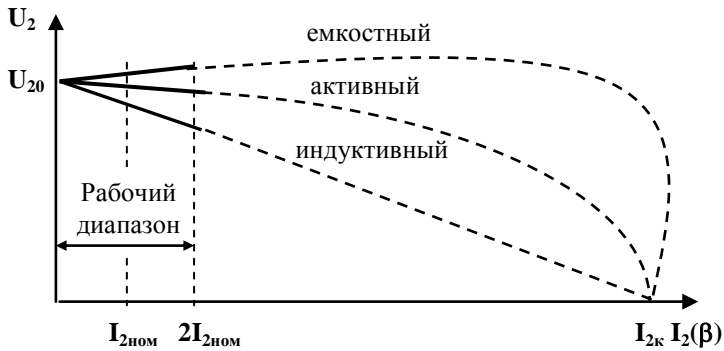


Рис 2. Обищий вид внешних характеристик трансформатора при различном характере нагрузки

Внешние характеристики второго типа (рис. 3) представляют собой зависимость изменений напряжения от фазового угла нагрузки $\Delta U_2 = f(\varphi_2)$ при неизменном модуле тока $\beta = \text{const}$. Обычно эта зависимость выражается в относительных единицах (или в процентах):

$$\Delta U^*_2 = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} = \beta(u_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \sin \varphi_2). \quad (4)$$

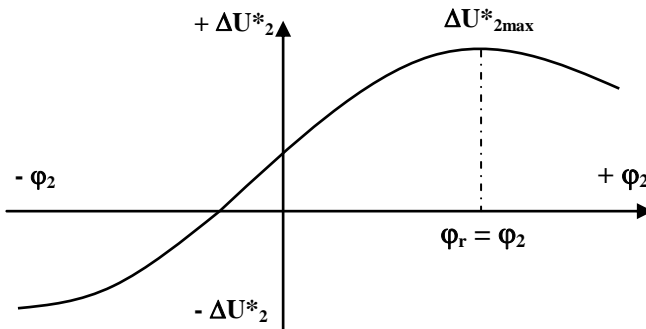


Рис. 3. Типовая зависимость отклонений напряжения от фазового угла φ_2 при неизменном коэффициенте загрузки

Основным критерием оценки энергетической эффективности применения трансформаторов является **коэффициент полезного действия (к.п.д.)**, численно равный отношению активной мощности на выходе к активной мощности на входе:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P} = \frac{P_1 - \sum \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1}, \quad (5)$$

где $\sum \Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_k$ – сумма потерь активной мощности в трансформаторе.

К.п.д. трансформаторов очень высок и достигает в силовых трансформаторах **98 – 99%**, поэтому его определение по прямым замерам мощности может дать большую погрешность. ГОСТ регламентирует косвенный метод расчета, в основу которого положено измерение потерь. Потери ΔP_0 называются постоянными, поскольку мало зависят от нагрузки. Они практически равны потерям в стали трансформатора, и определяются на основании опыта холостого хода. Переменные потери пропорциональны квадрату тока нагрузки. Их называют также электрическими, или потерями короткого замыкания. При расчетах **к.п.д.** переменные потери вычисляются через коэффициент загрузки и номинальные потери короткого замыкания, определенные в результате проведения соответствующего опыта, по формуле:

$$\Delta P_k = I_2^2 r_k = \left(\frac{I_2}{I_{2ном}} \right)^2 I_{2ном}^2 r_k = \beta^2 \Delta P_{к.ном} \quad (6)$$

В рабочем диапазоне вторичное напряжение трансформатора изменяется мало, поэтому активную мощность на выходе можно выразить через коэффициент загрузки, полную номинальную мощность и коэффициент мощности нагрузки:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx \beta U_{2ном} I_{2ном} \cos \varphi_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2. \quad (7)$$

Подставляя в исходное уравнение значения P_2 , ΔP_0 и ΔP_k , получаем зависимость **к.п.д** от коэффициента загрузки:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_0 + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \Delta P_0 + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}} \quad (8)$$

В режимах холостого хода и короткого замыкания к.п.д. равен нулю. Максимальное значение он имеет при равенстве постоянных и переменных потерь, при коэффициенте загрузки численно равном:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{\text{к.ном}}}} \quad (9)$$

Обычно трансформаторы проектируются таким образом, чтобы он находился в пределах: $0,5 \leq \beta_{\text{опт}} \leq 0,7$. Значение η_{max} зависит от характера нагрузки, что следует из анализа уравнения (8). Абсолютный максимум достигается при чисто активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1$). При нарушении этого условия независимо от характера нагрузки: $\cos \varphi_2 < 1$, в результате знаменатель дроби уменьшается, а сама дробь – увеличивается, что приводит к снижению к.п.д. Типовые характеристики $\eta = f(\beta)$ показаны на рис. 4.

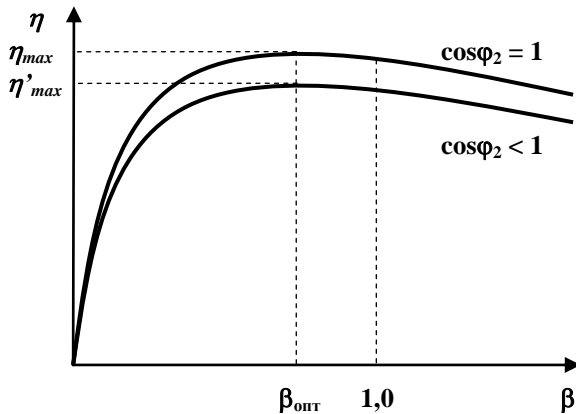


Рис. 4. Типовые зависимости к.п.д. от коэффициента загрузки

К.п.д трансформаторов уже при $\beta = 0,2 - 0,3$ приближается к максимальному значению, после чего его изменения очень незначительны в широком диапазоне. Это является весьма ценным свойством, поскольку позволяет обеспечить высокую эффективность их работы при значительных колебаниях нагрузки

2. Порядок выполнения работы

2.1 Записать необходимые для расчета эксплуатационных характеристик данные трансформатора: номинальные ток и напряжение, полную, активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания, номинальные потери холостого хода и короткого замыкания.

2.2. Рассчитать по формулам (1) – (3) внешние характеристики $U^*_2 = f(\beta)$ для активного и емкостного характера нагрузки, а также для случая $\varphi_2 = \varphi_k$. Расчет по формулам (1) и (2) выполнить для значений коэффициента нагрузки $\beta = 1,0$ и $\beta = 10$, а расчет по формуле (3) – для всех значений, указанных в таблице. Сравнить полученные значения, сделать выводы о применимости формул. Построить в одних координатах графические зависимости $U^*_2 = f(\beta)$

β	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	10
$U^*_2(1)$	-	-	-	-	-		
$U^*_2(2)$	-	-	-	-	-		
$U^*_2(3)$							

2.3 Рассчитать по формуле (4) характеристику $\Delta U_2 = f(\varphi_2)$ при коэффициенте загрузки $\beta = 1$. Построить графическую зависимость.

φ_2	-60°	-45°	-30°	0	30°	45°	60°
U^*_2							

2.4 Рассчитать по формуле (8) характеристику $\eta = f(\beta)$. По формуле (9) определить оптимальный коэффициент загрузки и соответствующий ему к.п.д. при коэффициентах мощности нагрузки, заданных преподавателем. Построить графические зависимости

β	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5
η ($\cos\varphi_2=1$)							
η ($\cos\varphi_2=?$)							

2.5 Для экспериментальных исследований внешних характеристик $U^*_2 = f(\beta)$ изобразить самостоятельно и собрать схему, в которой первичные обмотки трансформатора соединяются в звезду и подключаются к сети, а ко вторичным обмоткам через комплект измерительных приборов подключается блок нагрузок.

2.6 Включить схему и провести соответствующие измерения. Характер нагрузки задается преподавателем. Данные занести в таблицу и построить по ним графические зависимости в тех же координатах, что и расчетные

I_2	0					
$\beta = I_2 / I_{2ном}$	0					
U_2						
$U^*_2 = U_2 / U_{20}$	1,0					

2.7 Для экспериментальных исследований характеристик $\eta = f(\beta)$ изобразить самостоятельно и собрать схему, в которой как трансформатор, так и блок нагрузок подключаются через комплекты измерительных приборов.

2.8 Измерения проводить при чисто активной нагрузке. Данные занести в таблицу и построить по ним графическую зависимость в тех же координатах, что и расчетные

I_2	0					
$\beta = I_2 / I_{2ном}$	0					
$\sum P_1$						
$\sum P_2$	0					
η	0					

2.9 Оформить отчет. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

- 1) Дать определение внешних характеристик трансформаторов
- 2) Может ли выходное напряжение трансформаторов возрастать при увеличении тока нагрузки?
- 3) Пояснить, в каких случаях и почему для расчета внешних характеристик применяются формулы (1)–(3)
- 4) В чем заключается различие между активной и реактивной составляющими напряжения короткого замыкания с точки зрения их влияния на выходное напряжение трансформатора?
- 5) При каком условии наблюдается максимальное уменьшение выходного напряжения?
- 6) Как влияют характер нагрузки на внешние характеристики?
- 7) Может ли и в каком диапазоне выходное напряжение трансформатора оставаться неизменным при изменении величины тока?
- 8) Дать определение **к.п.д.** трансформатора. Можно ли рассчитать его по известным значениям тока и напряжения?
- 9) Почему в режимах холостого хода и короткого замыкания **к.п.д.** трансформатора равен нулю?
- 10) При каком условии **к.п.д.** трансформатора имеет максимальное значение? От чего оно зависит?
- 11) Почему зависимость $\eta = f(\beta)$ рассчитывается косвенным методом? Какие параметры трансформатора необходимо знать для такого расчета?