О КОЭФФИЦИЕНТЕ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Канд. техн. наук, доц. Гончар А. А.

Белорусский национальный технический университет

В общепринятой формулировке коэффициент полезного действия – это числовая характеристика энергетической эффективности устройства или машины. КПД (η) определяется как отношение полезно использованной энергии (т. е. превращенной в работу) к суммарному количеству энергии, переданной системе.

Вследствие неизбежных потерь КПД всегда меньше единицы. Таким образом, КПД представляет собой безразмерную величину – отношение получаемого полезного эффекта A_3 к затратам A_3

$$\eta = \frac{A_3}{A_3}. \quad (1)$$

Разность между A_3 и A_3 равна потерям ΔA в системе. Символы A_3 , A_3 , ΔA выражены в именованных единицах и

$$\Delta A = A_3 - A_3. \quad (2)$$

Для идеальной системы, когда $\Delta A = 0$, $A_3 = A_3$, значение КПД равно 1. В режиме холостого хода $A_3 = 0$, $\Delta A = A_3$ и значение КПД равно 0.

Таким образом, когда работа устройства определяется означенными режимами, имеется четкая связь между η , A_3 , A_3 , ΔA . В этих случаях однозначно решается задача определения как A_3 , A_3 , ΔA по известному η , так и по известным A_3 , A_3 , ΔA .

Оценим ситуацию в диапазоне изменения КПД между этими граничными значениями, т. е. при $0 < \eta < 1$. Для этого представим выражение (1) в виде

$$\eta = \frac{cA_3}{cA_3} = \text{const}, \quad (3)$$

где c – некоторая положительная величина.

Тогда выражение (2) примет вид

$$\Delta A = cA_3 - cA_3 = c(A_3 - A_3). \quad (4)$$

Из (4) теоретически следует, что каждому значению η может соответствовать бесчисленное число значений ΔA . В связи с этим только величина КПД по выражению (3) не дает полного и однозначного ответа на вопрос об эффективности использования трансформатора. Этот вывод носит

общий характер и может быть распространен на все виды машин, а не только трансформаторы.

Чтобы исключить указанную неопределенность, необходимо, как это следует из (1), кроме величины КПД знать как минимум A_2 или A_3 , соответствующие заданному КПД. Это касается и выражения (2). Здесь, например, кроме ΔA , необходимо располагать сведениями о величинах тех же A_2 и A_3 .

Для подтверждения (или опровержения) высказанного предположения о возможности существования таких величин КПД, которые имеют место при различных ΔA (при двух значениях суммарных потерь мощности), обратимся к выражению КПД силового трансформатора. Как известно, трансформатор – это электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования одной системы переменного тока в другую. В этом заключается основное отличие трансформаторов от электрических машин, в которых один вид энергии превращается в другой: механической – в электрическую в генераторах и электрической – в механическую в двигателях.

В доступной литературе для трансформаторов выражение (1) представляется в виде

$$\eta = \frac{kS_n \cos \varphi_2}{kS_n \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{ст}} + k^2 \Delta P_{\text{мн}}}, \quad (5)$$

где k – коэффициент загрузки; S_n – номинальная мощность; $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности; $\Delta P_{\text{ст}}$ – мощность потерь холостого хода; $\Delta P_{\text{мн}}$ – мощность потерь в обмотках при номинальном токе.

Наличие $\cos \varphi_2$ в выражении (5) свидетельствует о том, что при одном и том же коэффициенте загрузки k трансформатор будет работать с различными величинами КПД. Это обстоятельство практически исключает возможность определения коэффициента загрузки k по известному η . Кроме того, в (5) не учитывается потребление мощности охлаждающими устройствами трансформатора.

Для определения коэффициентов загрузки k_1 и k_2 , при которых КПД будет одинаковым ($\eta_1 = \eta_2$), запишем выражение (5) в виде

$$\frac{k_1 S_n \cos \varphi_2}{k_1 S_n \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{ст}} + k_1^2 \Delta P_{\text{мн}}} = \frac{k_2 S_n \cos \varphi_2}{k_2 S_n \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{ст}} + k_2^2 \Delta P_{\text{мн}}}. \quad (6)$$

Проведя необходимые преобразования, в итоге получим

$$k_1 k_2 \Delta P_{\text{мн}} = \Delta P_{\text{ст}}. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что $\Delta P_{\text{мн}}$ и $\Delta P_{\text{ст}}$ – постоянные величины, выражение (7) можно представить в виде

$$k_1 k_2 = \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{мн}}}. \quad (8)$$

На основании (8) можно сделать заключение, что между k_1 и k_2 существует гиперболическая зависимость. Если коэффициенты загрузки связаны и определяются выражением (7), то трансформаторы будут работать

с одинаковыми КПД. В общем случае потери мощности в трансформаторе распределяются следующим образом:

- при коэффициенте загрузки k_1

$$\Sigma \Delta P_1 = \Delta P_{\text{ст}} + k_1^2 \Delta P_{\text{мн}}; \quad (9)$$

- при коэффициенте загрузки k_2

$$\Sigma \Delta P_2 = \Delta P_{\text{ст}} + k_2^2 \Delta P_{\text{мн}}. \quad (10)$$

С учетом выражения (7)

$$k_2 = \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{k_1 \Delta P_{\text{мн}}}. \quad (11)$$

Тогда формула (10) примет вид

$$\Sigma \Delta P_2 = \Delta P_{\text{ст}} + \left(\frac{\Delta P_{\text{ст}}}{k_1 \Delta P_{\text{мн}}} \right)^2 \Delta P_{\text{мн}} = \frac{\Delta P_{\text{ст}} (k_1^2 \Delta P_{\text{мн}} + \Delta P_{\text{ст}})}{k_1^2 \Delta P_{\text{мн}}} = \Sigma \Delta P_1 \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{k_1^2 \Delta P_{\text{мн}}}. \quad (12)$$

Принимая в (7), как частный случай, что $k_1 = k_2 = k$, имеем

$$k^2 \Delta P_{\text{мн}} = \Delta P_{\text{ст}} \text{ или } k = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{мн}}}}. \quad (13)$$

Это, как известно, является условием максимума КПД трансформатора. С учетом (13) выражение (5) принимает вид

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{мн}}}} S_{\text{H}} \cos \varphi_2}{\sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{мн}}}} S_{\text{H}} \cos \varphi_2 + 2 \Delta P_{\text{ст}}}. \quad (14)$$

Уместно заметить, что максимуму КПД (η_{max}) не соответствует минимум суммарных потерь мощности. Суммарные потери мощности при η_{max} равны

$$\Sigma \Delta P = 2 \Delta P_{\text{ст}}. \quad (15)$$

Минимальные потери мощности имеют место при $k = 0$ и равны

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{ст}}. \quad (16)$$

В связи с этим многочисленные рекомендации по эксплуатации трансформаторов с коэффициентами загрузки, близкими к $k = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{мн}}}}$ (уравнение (13)), не могут быть обоснованными. Саму же постановку вопроса

о поисках оптимальной загрузки трансформатора надо считать некорректной.

Возвращаясь к (14), необходимо отметить, что величина $\eta_{\max}$ не фиксирована, а определяется характером нагрузки и зависит от $\cos\varphi_2$. Коэффициент же загрузки, соответствующий $\eta_{\max}$, определяется паспортными данными трансформатора $\Delta P_{\text{ст}}$ и $\Delta P_{\text{мн}}$.

Если каким-либо образом установлена величина КПД и она оказалась меньше максимального значения $\eta_{\max}$, то невозможно однозначно определить коэффициент загрузки (k_1 или k_2 в соответствии с (7)). В одном случае суммарные потери мощности $\Sigma\Delta P < 2\Delta P_{\text{ст}}$, а в другом $\Sigma\Delta P > 2\Delta P_{\text{ст}}$.

Назовем определение коэффициентов загрузки трансформатора k по известному значению КПД η обратной задачей. Указанная задача имеет единственное решение, когда $\eta = \eta_{\max}$. Допустим, что для данного трансформатора известны суммарные потери мощности – $\Sigma\Delta P = \Delta P_{\text{ст}} + k^2\Delta P_{\text{мн}}$. В этом случае легко определить коэффициент загрузки

$$k = \sqrt{\frac{\Sigma\Delta P - \Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{мн}}}}, \quad (17)$$

учитывая, что $k = \frac{S}{S_{\text{н}}} = \frac{I}{I_{\text{н}}}$, где S , I – текущие значения; $S_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$ – номинальные значения мощности и тока.

По этим данным и известному $\cos\varphi_2$, если необходимо, можно определить КПД. Как правило, на практике решается прямая задача, когда по известному значению k определяются все составляющие, необходимые для объективной оценки качества передачи энергии.

В силу изложенного выше и учитывая специфику составляющих, входящих в выражение (5), КПД в данном виде представляет разве что теоретический интерес при исследовании силовых трансформаторов.

ВЫВОД

Трудно поверить в объективность оценки качества преобразования энергии с помощью критерия, величина которого зависит от формы представления исходного материала.

Представлена
кафедрой электроснабжения

Поступила 13.03.2013