

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА СНИЖЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6-10/0,4 КВ ПРИ ПИТАНИИ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ

В. А. Мороз

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель Т. В. Алферова

За последние годы возросла нагрузка жилых и административных зданий. С ростом нагрузки изменился и ее характер. Возросло количество нелинейных потребителей (в частности, компьютеров, телевизоров, DVD-плееров, микроволновых печей, кондиционеров и др.), являющихся источниками высших гармоник, которые негативно влияют на оборудование электрической сети [1]. С внедрением программ энергосбережения все активнее заменяются обычные лампы накаливания энергосберегающими и широко применяется частотно-регулируемый электропривод.

Несмотря на относительно небольшую мощность каждого отдельного электроприемника, их массовое применение приводит к существенному искажению синусоидальности кривых напряжения и тока в электрических сетях напряжением 380 В. Несинусоидальность напряжений и токов оказывает влияние на работу электрооборудования, сокращая срок его службы, приводит к увеличению потерь напряжения и мощности в сети, уменьшению ее пропускной способности [2].

Снижение пропускной способности трансформатора из-за несинусоидальных токов определяется увеличением дополнительных потерь от токов высших гармоник. Все потери в трансформаторе можно разделить на условно-постоянные (потери холостого хода  $P_{xx}$ ), возникающие из-за перемагничивания стали сердечника, и условно-переменные (нагрузочные потери  $P_{нагр}$ ) [3]. Нагрузочные потери определяются из опыта короткого замыкания и разделяются на основные потери ( $P_{осн}$ ) в обмотках трансформатора и добавочные потери от действия полей рассеяния ( $P_{доп}$ ). Потери от полей рассеяния могут быть определены как потери из-за рассеяния электромагнитного потока в обмотках, стенках бака, прессующих кольцах, ярмовых балках, нажимных и стяжных пластинах, бандажках и экранах. Потери от полей рассеяния определяются вычитанием основных потерь от измеренных в опыте короткого замыкания нагрузочных потерь.

$$P_{доп} = P_{нагр} - P_{осн} \quad (1)$$

Потери от полей рассеяния разделяют на потери в проводнике обмоток ( $P_{обм}$ ) и потери рассеяния в других частях трансформатора, кроме обмотки. Потери от рассеяния в обмотках включают потери на вихревые токи и потери из-за циркуляции токов. Для удобства восприятия изложенного материала в дальнейшем представим упомянутые выше потери активной мощности в графическом виде с помощью диаграммы (рис. 1).

Высшие гармоники тока увеличивают среднеквадратическое значение тока нагрузки, что влечет за собой пропорциональное увеличение основных потерь в обмотке.

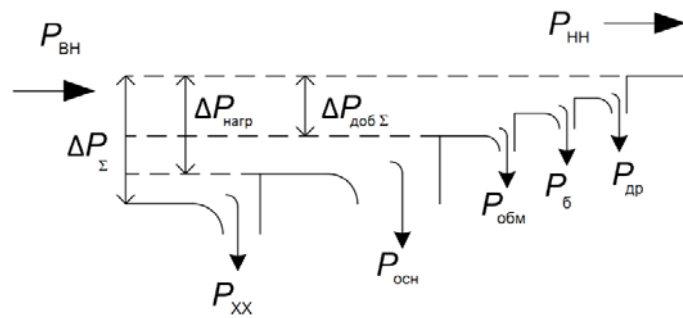


Рис. 1. Диаграмма распределения потерь активной мощности в трансформаторе:  
 $P_{ВН}$  – суммарная мощность на стороне высокого напряжения;  $P_{НН}$  – суммарная мощность на стороне низкого напряжения;  $P_{ХХ}$  – потери холостого хода;  
 $P_{нагр}$  – нагрузочные потери (потери короткого замыкания);  $P_{осн}$  – основные (омические) потери;  $P_{доб \Sigma}$  – дополнительные потери от действия полей рассеяния;  $P_{обм}$  – потери от вихревых и циркулирующих токов в обмотках, вызванные действием полей рассеяния;  $P_{б}$  – потери в баке трансформатора;  $P_{др}$  – потери от вихревых токов в других частях трансформатора (кроме обмоток и бака), вызванные действием полей рассеяния

Потери от вихревых токов ( $P_{обм}$ ) увеличиваются пропорционально квадрату тока нагрузки и пропорциональны квадрату частоты:

$$P_{обм} = P_{обм.ном} \sum_{n=1}^{n=n_{max}} \left( \frac{I_n}{I_{ном}} \right)^2 n^2, \quad (2)$$

где  $P_{обм.ном}$  – потери в обмотке от вихревых токов при номинальных условиях, Вт;  $n$  – номер гармоники;  $I_n$  – среднеквадратичное значение тока гармоники  $n$ , А;  $I_{ном}$  – среднеквадратичное значение основного тока при номинальной частоте и номинальных нагрузочных условиях, А.

Добавочные потери от полей рассеяния в баке, прессующих балках, зажимах и других конструктивных частях трансформатора также увеличиваются на величину, пропорциональную квадрату тока нагрузки. От частоты протекаемого тока потери мощности в баке зависят в степени 1,05, в других конструктивных частях трансформатора – в степени 0,8.

$$P_{б} = P_{б.ном} \sum_{n=1}^{n=n_{max}} \left( \frac{I_n}{I_{ном}} \right)^2 n^{1,05}, \quad (3)$$

где  $P_{б.ном}$  – добавочные потери от полей рассеяния в баке при номинальных условиях, Вт.

$$P_{др.ном} = P_{др.ном} \sum_{n=1}^{n=n_{max}} \left( \frac{I_n}{I_{ном}} \right)^2 n^{0,8}, \quad (4)$$

где  $P_{др.ном}$  – добавочные потери от полей рассеяния в других частях трансформатора (кроме бака и обмоток) при номинальных условиях, Вт. Также принимается, что величина потерь холостого хода не изменяется от порядка частоты и значения тока высших гармоник, протекаемых по обмоткам.

Для автоматизации расчета снижения пропускной способности трансформаторов 6-10/0,4 кВ при питании нелинейной нагрузки разрабатывается компьютерная программа на основе языка Delphi с простым и понятным интерфейсом. Алгоритм, лежащий в основе программы и позволяющий определить эквивалентную нагрузочную способность и понижающий коэффициент, учитывающий несинусоидальность тока при питании нелинейной нагрузки, представлен следующим образом.

Из паспортных данных трансформатора определяем величину общих потерь от полей рассеивания ( $P_{\text{доп}}$ ) по формуле (1). Значение потерь в баке трансформатора рассчитывается по формуле

$$P_{\text{б}} = 10kS, \quad (5)$$

где  $S$  – номинальная мощность трансформатора в кВА,  $k$  – коэффициент, принимаемый для трансформаторов 6–10 кВ равным 0,03–0,04.

Величина сопротивлений обмоток ВН и НН определяется на основании измерений сопротивления обмоток постоянному току, или на основе данных о массе провода катушки обмотки по формуле (6) для алюминиевого провода и для медного провода по формуле (7):

$$P_{\text{осн}} = 12,75j^2G; \quad (6)$$

$$P_{\text{осн}} = 2,4j^2G, \quad (7)$$

где  $j$  – плотность тока в обмотке, А/мм<sup>2</sup>;  $G$  – масса неизолированного провода, кг.

На основании полученных значений основных потерь в обмотках ВН и НН определяем величину потерь от вихревых токов в обмотках. Численно они равны величине 2/3 от значения добавочных потерь без учета потерь в баке:

$$P_{\text{обм}} = \frac{2}{3}(P_{\text{доп}} - P_{\text{б}}). \quad (8)$$

Рассчитываем значение величины потерь активной мощности в других конструктивных частях трансформатора ( $P_{\text{др}}$ ) путем вычитания из дополнительных потерь от полей рассеивания составляющих потерь от вихревых токов в обмотках и баке:

$$P_{\text{др}} = P_{\text{доп}} - P_{\text{б}} - P_{\text{обм}}. \quad (9)$$

Рассчитываем относительные величины:  $P_{*\text{нагр.ном}}$ ,  $P_{*\text{обм.ном}}$ ,  $P_{*\text{б.ном}}$ ,  $P_{*\text{др.ном}}$  по формулам (2)–(4), приняв за базисное значение величину основных потерь в обмотке.

На основании спектра гармоник тока, питающего нелинейную нагрузку, определяем коэффициенты  $K_{\text{обм}}$ ,  $K_{\text{б}}$ ,  $K_{\text{др}}$  по следующим формулам:

$$K_{\text{обм}} = \frac{\sum_{n=1}^{n=n_{\text{max}}} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2 n^2}{\sum_{n=1}^{n=n_{\text{max}}} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}; \quad K_{\text{б}} = \frac{\sum_{n=1}^{n=n_{\text{max}}} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2 n^{1,05}}{\sum_{n=1}^{n=n_{\text{max}}} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}; \quad K_{\text{др}} = \frac{\sum_{n=1}^{n=n_{\text{max}}} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2 n^{0,8}}{\sum_{n=1}^{n=n_{\text{max}}} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}. \quad (10)$$

Определяем значение длительно допустимого тока трансформатора с учетом высших гармоник тока:

$$\frac{I}{I_{\text{ном}}} = \sqrt{\frac{P_{*_{\text{нагр.ном}}}}{1 + K_{\text{обм}} P_{*_{\text{обм,ном}}} + K_{\text{б}} P_{*_{\text{б,ном}}} + K_{\text{др}} P_{*_{\text{др,ном}}}}}. \quad (11)$$

#### Литература

1. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В / В. Н. Тульский [и др.] // Пром. энергетика. – 2013. – № 5. – С. 42–47.
2. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
3. Силовые трансформаторы : справ. книга / под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. – М. : Энергоиздат, 2004. – 616 с.