

Вахнина Вера Васильевна

Vakhnina Vera Vasilyevna

Тольяттинский государственный университет

Togliatti state university

К.т.н., доцент, зав.кафедрой «Электроснабжение и электротехника»

Ph.D., assistant professor, department chair «Power supply and electrical equipment»

Кретов Дмитрий Алексеевич

Kretov Dmitry Alekseevich

Тольяттинский государственный университет

Togliatti state university

Ассистент кафедры «Электроснабжение и электротехника»

Assistant, Department of 'Electricity and Electrical Engineering "

E-Mail: VVVahnina@yandex.ru

Определение допустимых уровней геоиндуцированных токов для обеспечения работоспособности силовых трансформаторов при геомагнитных бурях

Definition of admissible levels of the geinduced currents for ensuring operability of power transformers at geomagnetic storms

Аннотация: Разработана методика определения основных и вихревых потерь в обмотках силового трансформатора за счёт действия геоиндуцированных токов при геомагнитных бурях. Показано, что в результате действия геоиндуцированных токов обмотка высокого напряжения силового трансформатора ТДЦ-400000/220 нагревается сильнее, чем обмотка низкого напряжения, поэтому наиболее нагретая точка принадлежит обмотке ВН силового трансформатора. Установлены допустимые значения геоиндуцированных токов в обмотке ВН силового трансформатора при различных коэффициентах загрузки силового трансформатора ТДЦ-400000/220, которые приводят к ограничениям нагрузочной способности силового трансформатора при геомагнитных бурях.

The Abstract: The method of determination of basic and vortex losses in the windings of the power transformer by the action of geinduced currents of geomagnetic storms. It is shown that the effect of geinduced current, high voltage winding of the power transformer TDTS-400000/220 more heat than low-voltage winding, so the most heated point belongs to HV winding power transformer. Are established permissible values of geinduced currents in HV winding power transformer at various load factors TDTS-400000/220 power transformer, that limit the load capacity of the power transformer in geomagnetic storms.

Ключевые слова: Геоиндуцированные токи, силовой трансформатор, потери в обмотках, коэффициент загрузки

Keywords: The geinduced currents, the power transformer, losses in windings, factor of loading

Геоиндуцированные токи (ГИТ), протекая по заземленным обмоткам силовых трансформаторов (СТ) систем электроснабжения (СЭС) во время геомагнитных бурь (ГМБ), изменяют режим работы силовых трансформаторов, переводя их магнитные системы в режим насыщения [1]. При насыщении магнитной системы силового трансформатора индукция магнитного потока рассеяния возрастает, вызывая увеличение вихревых токов, нагревающих металлические элементы конструкции (бак, прессующие кольца, ярмовые балки, и другие элементы конструкции) и токоведущие части (обмотки, отводы СТ), т.е. увеличиваются дополнительные потери активной мощности от вихревых токов в металлических и токоведущих частях силовых трансформаторов, которые полностью преобразуются в тепло. За счет протекания ГИТ и увеличения тока намагничивания в обмотках силовых трансформаторов возрастают рабочие токи, вызывая дополнительные основные потери. Дополнительно выделившееся тепло может нагреть металлические элементы конструкции и токоведущие части или локальные участки этих элементов выше предельной температуры. В районах, подвергающимся воздействиям геомагнитных бурь, местный нагрев из-за геоиндуцированных токов может вызвать термическую деградацию изоляции пластин сердечника силового трансформатора или главной изоляции его обмоток, что приведет к сокращению срока службы силового трансформатора [2].

Основные потери силового трансформатора рассчитываются по формуле [3]:

$$P_{осн} = \frac{I^2}{S^2} \frac{\lambda_M}{\rho_M} M, \quad (1)$$

где I - действующее значение тока обмотки при отсутствии ГИТ; J_{cp} – средняя действующая плотность тока в обмотке; M – масса токоведущих частей обмотки; λ_M – удельное электрическое сопротивление меди; ρ_M – плотность меди.

Среднюю действующую плотность тока в обмотке силового трансформатора J_{cp} можно выразить через действующее значение тока обмотки I при отсутствии ГИТ и суммарную площадь S поперечного сечения проводников, составляющих виток обмотки:

$$J_{cp} = \frac{I}{S}. \quad (2)$$

С учетом (1) основные потери в обмотке, вызванные рабочим током равным номинальному току I_n силового трансформатора (коэффициент загрузки $k_z = 1$) при отсутствии ГИТ:

$$P_{осн,н} = \frac{I_n^2}{S^2} \frac{\lambda_M}{\rho_M} M. \quad (3)$$

Основные потери в обмотке, вызванные суммарным током силового трансформатора при протекании ГИТ:

$$P_{осн\Sigma} = \frac{I_\Sigma^2}{S^2} \frac{\lambda_M}{\rho_M} M, \quad (4)$$

где I_Σ - действующее значение суммарного тока, протекающего через обмотку силового трансформатора при геомагнитной буре.

При геомагнитных бурях рабочий ток в заземленной обмотке силового трансформатора возрастает за счет протекания геоиндуцированного тока и несинусоидального тока намагни-

чивания. Тогда для квадрата действующего значения суммарного тока, протекающего через обмотку ВН силового трансформатора, можно записать выражение:

$$I_{\Sigma}^2 = I_{ГИТ}^2 + \left| \dot{I}_{1(1)} + \dot{I}_{0(1)} \right|^2 + \sum_{n=2}^{n_k} I_{0(n)}^2, \quad (5)$$

где $I_{ГИТ}$ – действующее значение геоиндуцированного тока; $\dot{I}_{1(1)}$ – комплексное действующее значение первой гармоники рабочего тока, протекающего по обмотке СТ при отсутствии ГИТ (в расчетах принято $I_{1(1)} = I = k_3 I_n$); $\dot{I}_{0(1)}$ – комплексное действующее значение первой гармоники тока намагничивания; n_k – число учитываемых гармонических составляющих тока намагничивания

Для наиболее тяжелого режима для силового трансформатора, когда первая гармоника рабочего тока, протекающего по заземленной обмотке СТ при отсутствии ГИТ, $\dot{I}_{1(1)}$ и первая гармоника тока намагничивания $\dot{I}_{0(1)}$ действуют в фазе. В этом случае:

$$I_{\Sigma}^2 = I^2 + I_{ГИТ}^2 + 2I \cdot I_{0(1)} + I_{0(1)}^2 + \sum_{n=2}^{n_k} I_{0(n)}^2. \quad (6)$$

Относительное значение основных потерь силового трансформатора:

$$\frac{P_{осн\Sigma}}{P_{осн,n}} = k_3^2 + I_{ГИТ}^2 + 2k_3 I_{0(1)} + \sum_{n=1}^{n_k} I_{0,n}^2, \quad (7)$$

где $I_{ГИТ}^* = I_{ГИТ} / I_n$, $I_{0(1)}^* = I_{0(1)} / I_n$, $I_{0,n}^* = I_{0(n)} / I_n$ - относительные значения токов силового трансформатора, приведенные к I_n .

Таким образом, $P_{осн\Sigma}$ можно представить в виде:

$$P_{осн\Sigma} = P_{осн} + \tilde{P}_{осн}, \quad (8)$$

где $P_{осн} = k_3^2 P_{осн,n}$ – основные потери в обмотке силового трансформатора при отсутствии ГИТ, $\tilde{P}_{осн}$ – дополнительные основные потери в обмотке силового трансформатора, вызванные протеканием ГИТ:

$$\tilde{P}_{осн} = P_{осн,n} \cdot \left(I_{ГИТ}^2 + 2k_3 I_{0(1)}^* + I_{0(1)}^2 + \sum_{n=2}^{n_k} I_{0(n)}^2 \right). \quad (9)$$

Дополнительные основные потери в обмотке силового трансформатора, вызванные протеканием ГИТ $\tilde{P}_{осн}$ можно представить в виде трёх составляющих:

$$\tilde{P}_{осн} = \tilde{P}_{осн,ГИТ} + \tilde{P}_{осн(1)} + \tilde{P}_{осн(n)}, \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \tilde{P}_{осн, ГИТ} &= P_{осн,н} \cdot I_{ГИТ}^2, \\ \text{где } \tilde{P}_{осн(1)} &= P_{осн,н} \cdot (2k_3 I_{0(1)}^* + I_{0(1)}^{*2}), \\ \tilde{P}_{осн(n)} &= P_{осн,н} \cdot \sum_{n=2}^{n_k} I_{0(n)}^{*2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

- дополнительные основные потери в обмотке силового трансформатора, вызванные протеканием ГИТ, первой гармоникой тока намагничивания и гармоническими составляющими тока намагничивания соответственно. Составляющая $\tilde{P}_{осн(1)}$ также зависит от коэффициента загрузки силового трансформатора.

Суммарный эффект увеличения основных и вихревых потерь в обмотках силового трансформатора за счёт действия геоиндуцированных токов при ГМБ можно определить из соотношений:

для обмотки высокого напряжения (ВН)

$$P_{\Sigma}^B = P_{осн}^B + \tilde{P}_{осн}^B + P_{вих}^B + \tilde{P}_{вих}^B; \quad (12)$$

для обмотки низкого напряжения (НН):

$$P_{\Sigma}^H = P_{осн}^H + \tilde{P}_{осн}^H + P_{вих}^H + \tilde{P}_{вих}^H, \quad (13)$$

суммарные потери для обмоток ВН и НН:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma}^B + P_{\Sigma}^H = P_{осн\Sigma} + \tilde{P}_{осн\Sigma} + P_{вих\Sigma} + P_{вих\Sigma}, \quad (14)$$

где $P_{осн\Sigma} = P_{осн}^B + P_{осн}^H$ - суммарные основные потери в обмотках ВН и НН силового трансформатора при отсутствии ГИТ; $\tilde{P}_{осн\Sigma} = \tilde{P}_{осн}^B + \tilde{P}_{осн}^H$ - суммарные дополнительные основные потери в обмотках ВН и НН силового трансформатора, вызванные протеканием ГИТ; $P_{вих\Sigma} = P_{вих}^B + P_{вих}^H$ - суммарные добавочные потери в обмотках ВН и НН от вихревых токов при отсутствии ГИТ; $\tilde{P}_{вих\Sigma} = \tilde{P}_{вих}^B + \tilde{P}_{вих}^H$ - суммарные дополнительные добавочные потери в обмотках ВН и НН силового трансформатора от вихревых токов, вызванные протеканием ГИТ. Дополнительные добавочные потери в обмотках ВН и НН силового трансформатора от вихревых токов рассчитываются по методике, изложенной в [4].

В результате моделирования насыщения магнитной системы силового трансформатора ТДЦ-400000/220 (схема соединения обмоток Yн/Δ) геоиндуцированными токами различной интенсивности и расчета основных и вихревых потерь в обмотках по формулам (9) – (14) получены зависимости дополнительных суммарных потерь для обмоток ВН и НН (\tilde{P}/P), дополнительных потерь в обмотках ВН и НН, а также вклад основных и вихревых составляющих в дополнительные потери для силового трансформатора ТДЦ-400000/220 при номинальном режиме работы от величины ГИТ (рис.1).

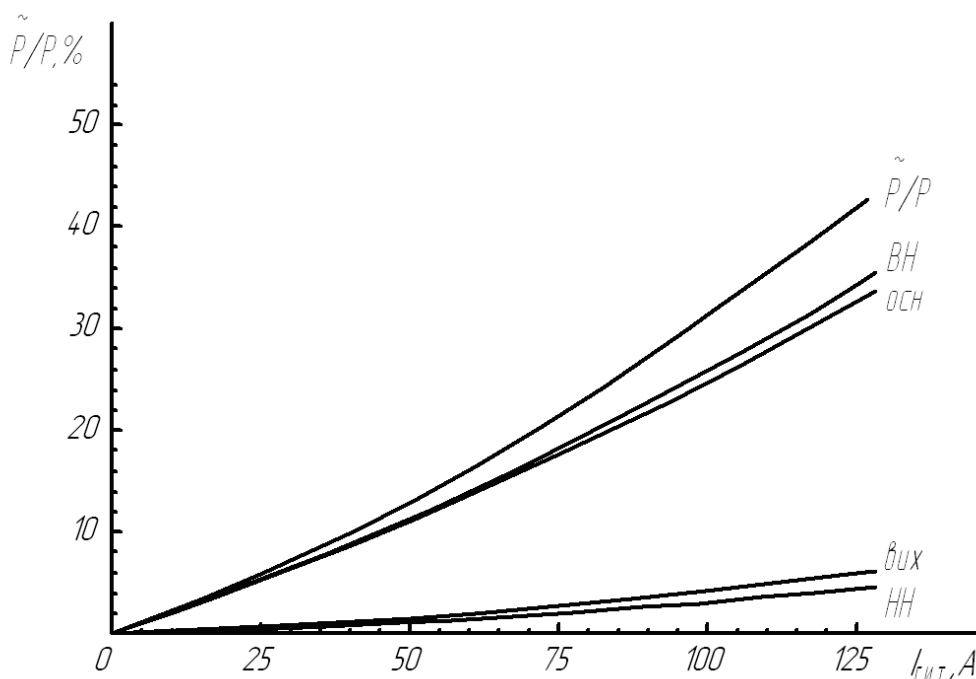


Рис. 1. Зависимости дополнительных потерь для обмоток ВН и НН силового трансформатора от величины ГИТ для силового трансформатора ТДЦ-400000/220 ($k_3 = 1$)

Выполненное моделирование показывает, что в результате действия ГИТ обмотка ВН нагревается сильнее, чем обмотка НН. Поэтому наиболее нагретая точка (ННТ) принадлежит обмотке ВН силового трансформатора.

Превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой окружающей СТ среды (воздуха) определяется соотношением [5]:

$$\Delta\Theta_{ННТ} = \Delta\Theta_{мм,н} \cdot \left(\frac{\alpha + k_3^2}{\alpha + 1} \right) + 1,1 \cdot \Delta\Theta_{о-м,н} \cdot k_3^{2m'} \quad (15)$$

где $\Delta\Theta_{ННТ}$ – превышение температуры ННТ над температурой окружающей среды; $\Delta\Theta_{мм,н}$ – превышение наибольшей температуры масла в баке над температурой окружающей среды при номинальной нагрузке; $\Delta\Theta_{о-м,н}$ – превышение средней температуры обмотки над средней температурой масла в обмотке при номинальной нагрузке; α – отношение потерь холостого хода к потерям короткого замыкания ($\alpha = P_x / P_k$); при естественной циркуляции масла и воздуха показатель степени $m=0,8$, при естественной циркуляции масла и принудительной циркуляции воздуха $m=1,0$; при естественной циркуляции масла $m' = 0,8$, при принудительной $m' = 0,9$ и при направленной $m' = 1$ [5].

Для определения превышения температуры ННТ над температурой окружающей среды и соответственно зависимости допустимого уровня ГИТ от нагрузки силового трансформатора выражение (14) переписано в виде:

$$\Delta\Theta_{ННТ} = \Delta\Theta_{мм,н} \cdot \left(\frac{\alpha + k_3^2}{\alpha + 1} \right) + 1,1 \cdot \Delta\Theta_{о-м,н} \cdot k_{3,В}^{2m'} \quad (16)$$

где $k_3^2 = \frac{P_{обм\Sigma}}{P_K}$; $k_{3,B}$ – коэффициент загрузки обмотки ВН силового трансформатора,
 $k_{3,B}^2 = \frac{P_{обм\Sigma}^B}{P_K^B}$.

Так как при номинальной нагрузке силового трансформатора $k_3 = k_{3,B} = 1$, то превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой окружающей среды (воздуха) при номинальной нагрузке силового трансформатора:

$$\Delta\theta_{ННТ,н} = \Delta\theta_{мм,н} + 1,1 \cdot \Delta\theta_{о-м,н}. \quad (16)$$

Из паспортных данных силового трансформатора ТДЦ-400000/220 $\Delta\theta_{мм,н} = 49^\circ C$, $\Delta\theta_{о-м,н} = 25,8^\circ C$. Тогда $\Delta\theta_{ННТ,н} = 77,4^\circ C$.

На рис.2 приведены зависимости превышения температуры ННТ над температурой окружающей среды от величины ГИТ при различных коэффициентах загрузки силового трансформатора, рассчитанные по формуле (16).

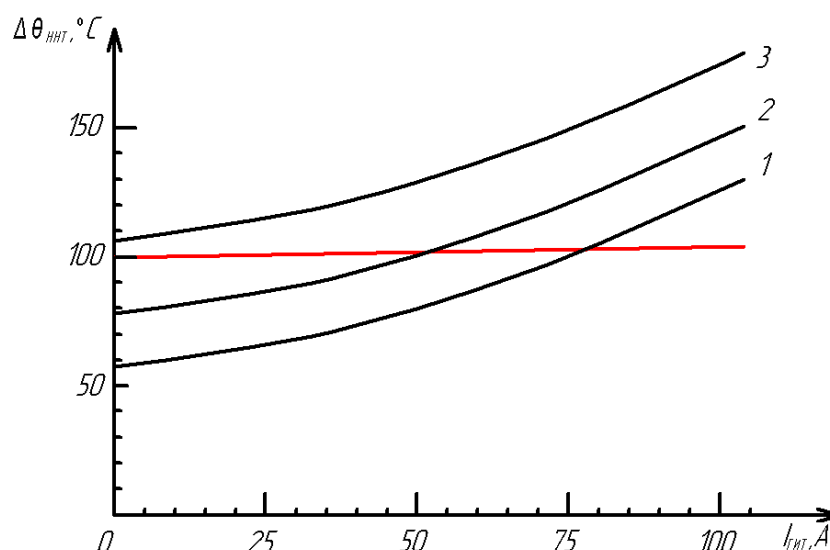


Рис. 2. Зависимости превышения температуры ННТ над температурой окружающей среды от величины ГИТ при различных k_3 силового трансформатора ТДЦ-400000/220 (1 - $k_3 = 0,7$; 2 - $k_3 = 1,0$; 3 - $k_3 = 1,4$)

На рис. 2. красным цветом показана прямая, соответствующая предельному превышению температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой окружающей среды $40^\circ C$ - уровень $100^\circ C$, при котором начинается газовыделение в минеральном трансформаторном масле [6] и газовая защита может сработать на отключение.

На основании рис.4.2 получены зависимости допустимых уровней геоиндуцированных токов в обмотках силового трансформатора ТДЦ-400000/220 от коэффициента загрузки, которые приведены на рис. 3.

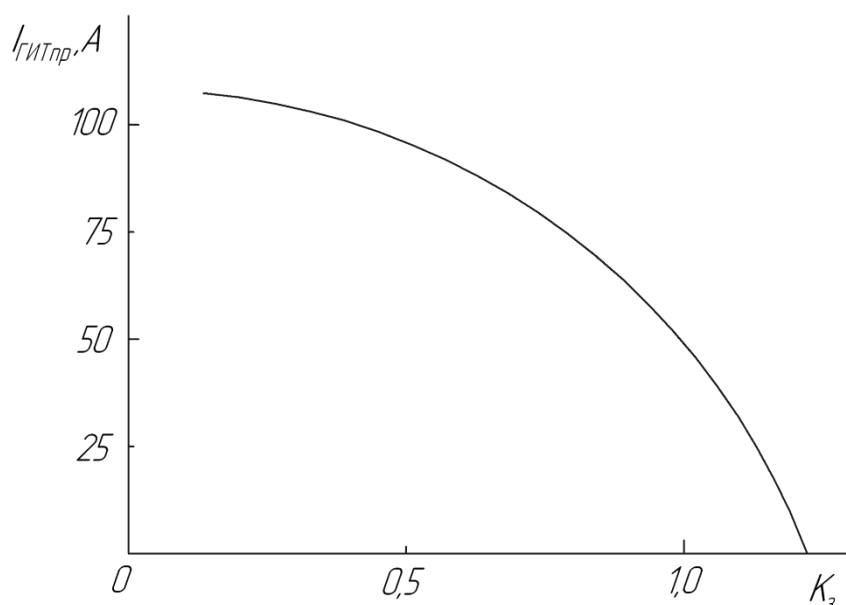


Рис. 3. Зависимости допустимых значений ГИТ при различной нагрузке силовых трансформаторов ТДЦ-400000/220

Таким образом, установлены допустимые значения ГИТ при различных коэффициентах загрузки силового трансформатора ТДЦ-400000/220, которые приводят к ограничениям нагрузочной способности силового трансформатора при геомагнитных бурях. При $k_3 = 0,7$ допустимый уровень ГИТ в обмотке ВН силового трансформатора 75 А; при номинальном режиме работы – 49 А. Для обеспечения работоспособности силового трансформатора при ГМБ допустимая аварийная перегрузка – 23 %, т.е. максимально возможный коэффициент загрузки силового трансформатора при ГМБ $k_3 = 1,23$. При $k_3 \geq 1,23$ геоиндуцированные токи вызовут перегрев обмоток силового трансформатора, и газовая защита может сработать на отключение, т.е. при геомагнитных бурях перегрузка силового трансформатора допустима не более чем на 23%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахнина В.В., Черненко А.Н., Кузнецов В.А. Влияние геоиндуцированных токов на насыщение магнитной системы силовых трансформаторов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. №3(21). С.65 - 69.
2. Гершенгорн А.И. Воздействия геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем // Электрические станции. 1993. №6. С.54-63.
3. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981. С. 392.
4. Вахнина В.В., Кузнецов В.Н., Шаповалов В.А., Кретов Д.А. Тепловая нагрузка бака силового трансформатора при глубоком насыщении магнитной системы // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2011. №4 (17). С. 21-33.
5. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. Трансформаторы: вып.36 / Под ред. Г.Е.Тарле. М.: Энергия, 1980. С. 208.
6. ГОСТ 14209 – 97. Трансформаторы (и автотрансформаторы) силовые масляные. Нагрузочная способность.