

УДК 621.313

Герасимук Александр Владимирович¹, инженер-проектировщик, Семькина Ирина Юрьевна², доктор техн. наук, доцент, Кипервассер Михаил Вениаминович³, канд. техн. наук, доцент

¹ АО «Сибирский Тяжпромэлектропроект», 654006, Россия, г. Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 5.

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

³ Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

E-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РАСЩЕПЛЕННОЙ ОБМОТКОЙ С УЧЕТОМ УСТРОЙСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ В ОБМОТКЕ ВЫСШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Аннотация: В статье предлагается метод расчета параметров схемы замещения силового трансформатора с расщепленной обмоткой низкого напряжения с учетом активных сопротивлений и наличия устройства регулирования напряжения под нагрузкой. Детально показан вывод основных зависимостей и формул, на которых базируется предлагаемый метод, приведены варианты пересчета параметров трансформатора для среднего и крайних положений устройства регулирования напряжения под нагрузкой при наличии исходных данных по опытам короткого замыкания и холостого хода трансформатора от завода-изготовителя, а также при их частичном отсутствии. Произведен расчет сопротивлений трансформатора в крайних и нулевом положениях устройства регулирования напряжения под нагрузкой по паспортным значениям напряжения короткого замыкания в крайних положениях и по значениям, полученным расчетным методом на основании линейной зависимости между диапазоном регулирования устройства регулирования напряжения под нагрузкой и напряжения короткого замыкания. Выполнено сравнение полученных результатов и сделаны выводы о точности предлагаемого метода.

Ключевые слова: трансформатор, расщепленная обмотка, схема замещения, устройство РПН.

Информация о статье: принята 01 июня 2019 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2019-2-52-59

Введение

В инженерной практике часто требуется производить расчеты токов короткого замыкания в системах электроснабжения, причем как в традиционных расчетах релейной защиты и автоматики распределительных сетей [1], так и при выполнении специфических расчетов [2, 3]. Один из важных этапов расчета – определение параметров схем замещения элементов цепи короткого замыкания. Как правило, в большинстве случаев в расчетную схему входит силовой трансформатор, снабженный устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Учет наличия устройства РПН представляет важную задачу, так как оно оказывает сильное влияние на величину тока короткого замыкания (КЗ) на стороне низкого напряжения. Расчет обычно производится для крайних положений РПН, но также бывают случаи, когда требуется определить ток короткого замыкания на каком-либо промежуточном положении РПН. За положительное положение РПН в статье принимается такое положение, при котором напряжение на стороне высокого напряжения (ВН)

трансформатора увеличивается относительно номинального, а за отрицательное – при котором уменьшается.

В крайнем положительном положении трансформатор имеет наибольшее сопротивление и наименьший ток КЗ на стороне низкого напряжения (НН). При крайнем отрицательном – наименьшее сопротивление и наибольший ток КЗ на стороне НН. Первый случай используется при проверках чувствительностей защит [1]. Второй случай – при выборе оборудования и проверки его на термическую и динамическую стойкость токам КЗ.

Наибольшую сложность в расчете схемы замещения имеет трансформатор с расщепленной обмоткой НН. Такие трансформаторы широко применяются на главных понизительных подстанциях 110–220 кВ крупных горно-металлургических и нефтеперерабатывающих предприятий. Классическая схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения на две части представляет из себя трехлучевую звезду [4–6], как это показано на рис. 1, где обозначено R , X , Z – соответственно

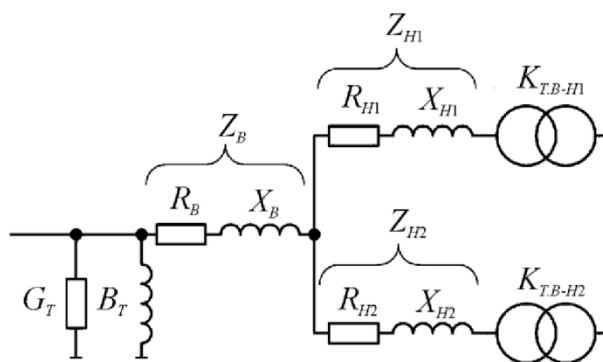


Рис. 1. Полная схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой

Fig. 1. Full scheme of equivalent circuit for a split-winding transformer

активное реактивное и полное сопротивление обмотки, Ом; $K_{T.B-H1}$ и $K_{T.B-H2}$ – коэффициенты трансформации из обмотки ВН в обмотку НН1 и НН2 соответственно; G_T и B_T – активная и реактивная проводимости ветви намагничивания, См. Сложность обусловлена необходимостью расчета дополнительных коэффициентов, существованием различных методов расчета этих коэффициентов, а также зачастую отсутствием экспериментальных данных о результатах проведения опытов короткого замыкания и холостого хода от завода-изготовителя.

По результату обзора зарубежной и отечественной литературы [1, 4-14] выявлено слабое освещение вопроса пересчета параметров трансформаторов с учетом устройств регулирования напряжения, а также отсутствие удобных в практических расчетах формул, устанавливающих взаимосвязи между напряжениями короткого замыкания пар обмоток.

Расчет параметров схемы замещения без учета устройства РПН

Для получения характеристик короткого замыкания с трансформатором с расщепленной обмоткой проводят четыре опыта короткого замыкания:

- 1) между обмотками ВН и НН (обмотка НН1 и НН2 включены на параллельную работу, при этом трансформатор работает как обычный двухобмоточный);
- 2) между обмотками ВН и НН1;
- 3) между обмотками ВН и НН2;
- 4) между обмотками НН1 и НН2.

При проведении опытов в первичной обмотке протекает ток короткого замыкания, равный номинальному рабочему току I_H , А. При этом напряжения, приложенные к выводам первичной обмотки, будут обозначаться соответственно $U_{K.BH}$, $U_{K.BH1}$, $U_{K.BH2}$, $U_{K.H1-H2}$, В. В паспортных данных эти величины обычно выражаются в процентах от номинального рабочего напряжения обмотки ВН, то есть:

$$U_{K.BH}^{\%} = \frac{U_{K.BH}}{U_{BH}} 100\%; \quad (1)$$

$$U_{K.BH1}^{\%} = \frac{U_{K.BH1}}{U_{BH}} 100\%; \quad (2)$$

$$U_{K.BH2}^{\%} = \frac{U_{K.BH2}}{U_{BH}} 100\%; \quad (3)$$

$$U_{K.H1-H2}^{\%} = \frac{U_{K.H1-H2}}{U_{BH}} 100\%. \quad (4)$$

При проведении опыта КЗ между частями обмотки НН по одной из частей, выполняющей в опыте роль первичной, протекает номинальный ток вторичной обмотки. Однако, так как в дальнейшем все расчетные величины сопротивлений приведены к высшему напряжению, то в формулах фигурирует только номинальный первичный ток.

На практике принимается, что части обмотки НН эквивалентны между собой, имеют одинаковые параметры и, соответственно, равные сопротивления, т.е. справедливо равенство:

$$U_{K.BH1} = U_{K.BH2}. \quad (5)$$

На основании вышеизложенного, а также на основании схемы замещения

можно составить систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} \frac{U_{K.BH}}{\sqrt{3}I_H} = Z_B + \frac{1}{2}Z_{H1}; \\ \frac{U_{K.BH1}}{\sqrt{3}I_H} = Z_B + Z_{H1}; \\ \frac{U_{K.H1-H2}}{\sqrt{3}I_H} = 2Z_{H1}, \end{cases} \quad (6)$$

преобразовав которую, выразим в каждом из уравнений сопротивления обмоток:

$$\begin{cases} Z_B = \frac{U_{K.BH}}{\sqrt{3}I_H} - \frac{1}{2}Z_{H1}; \\ Z_B = \frac{U_{K.BH1}}{\sqrt{3}I_H} - Z_{H1}; \\ Z_{H1} = \frac{U_{K.H1-H2}}{2\sqrt{3}I_H}, \end{cases} \quad (7)$$

откуда получим:

$$Z_B = \frac{U_{K.BH}}{\sqrt{3}I_H} - \frac{U_{K.H1-H2}}{4\sqrt{3}I_H} = \frac{4I_H U_{K.BH} - I_H U_{K.H1-H2}}{4\sqrt{3}I_H^2} = \frac{1}{\sqrt{3}I_H} \left(U_{K.BH} - \frac{U_{K.H1-H2}}{4} \right). \quad (8)$$

Выразим номинальный ток трансформатора через его номинальную мощность S_H , ВА и номинальное напряжение U_{BH} , учитывая при этом (1) – (4). Тогда (8) примет вид:

$$Z_B = \frac{\sqrt{3}U_{BH}}{\sqrt{3}S_H} \left(\frac{U_{K.BH}^{\%} U_{BH}}{100} - \frac{U_{K.H1-H2}^{\%} U_{BH}}{4 \cdot 100} \right) = \frac{U_{BH}^2}{100S_H} \left(U_{K.BH}^{\%} - \frac{U_{K.H1-H2}^{\%}}{4} \right). \quad (9)$$

Если вынести из-за скобок напряжение $U_{K.BH}^{\%}$ [4], получим:

$$Z_B = \frac{U_{K.BH}^{\%}}{100} \left(1 - \frac{U_{K.H1-H2}^{\%}}{4U_{K.BH}^{\%}} \right) \frac{U_{BH}^2}{S_H} = \frac{U_{K.BH}^{\%}}{100} \left(1 - \frac{K_P}{4} \right) \frac{U_{BH}^2}{S_H}. \quad (10)$$

где $K_P = \frac{U_{K.H1-H2}^{\%}}{U_{K.BH}^{\%}}$ – коэффициент расщепления обмоток [4, 15, 16].

Преобразуем третье уравнение (7) аналогичным образом [4] и получим:

$$Z_{H1} = \frac{U_{K.H1-H2}^{\%}}{200} \frac{U_{BH}^2}{S_H} = \frac{U_{K.BH}^{\%} K_P}{100 \cdot 2} \frac{U_{BH}^2}{S_H}. \quad (11)$$

Сопротивление обмотки ВН можно выразить не только из первого уравнения (7), но и из второго. Учитывая выполненные ранее преобразования, получаем следующее:

$$Z_B = \frac{U_{BH}^2 U_{KBH1}^{\%}}{100 S_H} - \frac{U_{BH}^2 U_{KH1-H2}^{\%}}{200 S_H} = \frac{U_{BH}^2}{100 S_H} \left(U_{KBH1}^{\%} - \frac{U_{KH1-H2}^{\%}}{2} \right). \quad (12)$$

Приравняв правые части выражений (9) и (12), а также сократив одинаковые сомножители и выполнив преобразования, можно записать:

$$U_{KBH}^{\%} - \frac{U_{KH1-H2}^{\%}}{4} = U_{KBH1}^{\%} - \frac{U_{KH1-H2}^{\%}}{2}; \quad (13)$$

$$U_{KH1-H2}^{\%} = 4(U_{KBH1}^{\%} - U_{KBH}^{\%}). \quad (14)$$

Формула (14) устанавливает взаимосвязь между напряжениями короткого замыкания двухобмоточного трансформатора с расщепленной на две части обмоткой НН.

Выразим левую часть (14) через коэффициент расщепления:

$$K_P U_{KBH}^{\%} = 4(U_{KBH1}^{\%} - U_{KBH}^{\%}). \quad (15)$$

После несложных преобразований получим другую формулу для расчета коэффициента расщепления [2]:

$$K_P = 4 \left(\frac{U_{KBH1}^{\%}}{U_{KBH}^{\%}} - 1 \right). \quad (16)$$

Также на основании (11) и (14) может быть получена другая вариация формулы расчета сопротивления обмотки НН:

$$Z_{H1} = \frac{2(U_{KBH1}^{\%} - U_{KBH}^{\%}) U_{BH}^2}{100 S_H}. \quad (17)$$

Активное сопротивление ВН рассчитывается по известной формуле [4]:

$$R_B = \frac{\Delta P_K U_{BH}^2}{2 S_H^2}, \quad (18)$$

где ΔP_K – потери короткого замыкания, Вт.

Для большего уточнения сопротивления трансформатора можно учесть температурную зависимость сопротивления обмотки по известной формуле [4]:

$$R_B = \frac{\Delta P_K U_{BH}^2}{2 S_H^2} [1 + \alpha_t (t - 20)], \quad (19)$$

где t – текущая температура обмотки трансформатора, °C; α_t – температурный коэффициент, зависящий от материала обмотки, °C⁻¹.

Важно отметить, что в дальнейшем при расчете активных сопротивлений трансформатора в крайних положениях РПН при получении значений напряжений короткого замыкания в крайних положениях РПН расчетным методом расчет активных сопротивлений следует выполнять не по (19), а по (18), поскольку температурное изменение сопротивлений будет уже учтено в значениях напряжений короткого замыкания вследствие того, что они зависят от активного сопротивления обмоток в среднем положении РПН.

Активное сопротивление каждой части обмотки НН определяется как:

$$R_{H1} = 2R_B, \quad (20)$$

а реактивное сопротивление обмоток трансформатора:

$$X_B = \sqrt{Z_B^2 - R_B^2}; \quad (21)$$

$$X_{H1} = \sqrt{Z_{H1}^2 - R_{H1}^2}. \quad (22)$$

Проводимости цепи намагничивания определяются следующими формулами [7]:

$$G_T = \frac{10^3 \cdot \Delta P_{XX}}{U_{BH}^2}; \quad (23)$$

$$B_T = \frac{I_{XX} S_H}{100 \cdot U_{BH}^2}, \quad (24)$$

где ΔP_{XX} – потери холостого хода, кВт; I_{XX} – ток холостого хода, %.

Метод 1. Пересчет параметров трансформатора с учетом устройства РПН в обмотке ВН при отсутствии исходных данных

При отсутствии заводских данных по испытанию трансформатора в крайних положениях РПН их можно получить расчетным путем. Известно, что напряжение короткого замыкания линейно зависит от числа витков [17, 18]:

$$U_K^{\%} = \sqrt{(U_{Ka}^{\%})^2 + (U_{Kp}^{\%})^2} = \sqrt{(J^2 w_1 K_{G1})^2 + \left(\frac{\pi \mu_0 \varphi w_1 I_1}{2,22 B} K_{G2} \right)^2} = w_1 \sqrt{(J^2 K_{G1})^2 + \left(\frac{\pi \mu_0 \varphi I_1}{2,22 B} K_{G2} \right)^2}, \quad (25)$$

где $U_{Ka}^{\%}$, $U_{Kp}^{\%}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, %; J – плотность тока в обмотке; А/мм²; I_1 – номинальный ток обмотки ВН, А; w_1 – число витков обмотки ВН; K_{G1} и K_{G2} – геометрические коэффициенты, определяемые при проектировании трансформатора; B – индукция в стержне магнитопровода, Тл; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; φ – угол между током и напряжением, эл. градус.

Примем, что устройство РПН установлено в обмотке ВН. Тогда при его работе происходит изменение числа витков обмотки ВН, то есть изменяется ее активное и реактивное сопротивление, при этом параметры обмотки НН остаются неизменны. Исходя из этого, на основании (6) запишем систему из двух уравнений, первое из которых относится к режиму работы трансформатора в среднем положении РПН, а второе – к режиму работы в крайних положениях РПН:

$$\begin{cases} U_{KBH} = \sqrt{3} I_H (Z_B + 0,5 Z_{H1}); \\ U_{KBH\pm} = \sqrt{3} I_H \left[Z_B \left(1 \pm \frac{\Delta U_{РПН}}{100} \right) + 0,5 Z_{H1} \right], \end{cases} \quad (26)$$

где $\Delta U_{РПН}$ – диапазон изменения напряжения трансформатора в крайних положениях РПН, % (обычно не более 16% в обе стороны); n – число ступеней РПН (от нулевого до крайнего, обычно не более 16 в каждую сторону); $U_{KBH\pm}$ – напряжение короткого замыкания при запараллеленных обмотках НН в крайних положениях РПН (знак плюс соответствует максимальному напряжению обмотки ВН, минус – минимальному).

Выразим из первого уравнения (26) ток и подставим его во второе уравнение:

$$U_{KBH\pm} = \frac{U_{KBH}}{(Z_B + 0,5 Z_{H1})} \left[Z_B \left(1 \pm \frac{\Delta U_{РПН}}{100} \right) + 0,5 Z_{H1} \right], \quad (27)$$

что в относительных единицах запишется как:

$$U_{KBH\pm}^{\%} = \frac{U_{KBH}^{\%}}{(Z_B + 0,5 Z_{H1})} \left[Z_B \left(1 \pm \frac{\Delta U_{РПН}}{100} \right) + 0,5 Z_{H1} \right]. \quad (28)$$

Таблица 1. Исходные данные для расчета
Table 1. Initial data for calculation

Параметр		Обозначение	Значение
Номинальная мощность, кВА		S_H	40000
Номинальное напряжение обмотки ВН, кВ		$U_{ВН}$	230
Номинальное напряжение обмотки НН1(2), кВ		$U_{НН}$	6,3
Диапазон регулирования устройства РПН, %		$\Delta U\%$	± 12
Число ступеней регулирования устройства РПН		n	± 12
Потери холостого хода, кВт		ΔP_{XX}	31,5
Потери короткого замыкания в положениях РПН, кВт	Мин	ΔP_{K-}	158,54
	Сред	ΔP_K	162,15
	Макс	ΔP_{K+}	165,62
Напряжение КЗ ВН-НН в положениях РПН, %	Мин	$U_{K.ВН-}$	11,79
	Сред	$U_{K.ВН}$	11,98
	Макс	$U_{K.ВН+}$	12,53
Напряжение КЗ ВН-НН1 в положениях РПН, %	Мин	$U_{K.ВН1-}$	21,61
	Сред	$U_{K.ВН1}$	21,83
	Макс	$U_{K.ВН1+}$	22,05
Напряжение КЗ НН1-НН2 в положениях РПН, %	Мин	$U_{K.Н1-Н2-}$	40,61
	Сред	$U_{K.Н1-Н2}$	
	Макс	$U_{K.Н1-Н2+}$	
Ток холостого хода, %		$I_{XX}^{\%}$	0,12
Температура обмоток, °С		t	20

Таблица 2. Расчетные значения напряжений КЗ
Table 2. Calculated values of short-circuit voltages

Параметр		Обозначение	Значение
Потери короткого замыкания в положениях РПН, кВт	Мин	ΔP_{K+}	152,42
	Сред	ΔP_K	162,15
	Макс	ΔP_{K-}	172,88
Напряжение КЗ ВН-НН в положениях РПН, %	Мин	$U_{K.ВН-}$	11,729
	Сред	$U_{K.ВН}$	11,98
	Макс	$U_{K.ВН+}$	12,241
Напряжение КЗ ВН-НН1 в положениях РПН, %	Мин	$U_{K.ВН1-}$	21,58
	Сред	$U_{K.ВН1}$	21,83
	Макс	$U_{K.ВН1+}$	2,09
Напряжение КЗ НН1-НН2 в положениях РПН, %	Мин	$U_{K.Н1-Н2-}$	39,4
	Сред	$U_{K.Н1-Н2}$	
	Макс	$U_{K.Н1-Н2+}$	

Таблица 3. Расчетные параметры схемы замещения трансформатора
Table 3. Calculated parameters of the transformer equivalent circuit

Расчетный параметр		Обозначение	Значение, полученное	
			методом 1	методом 2
Активное сопротивление обмотки ВН в положениях РПН, Ом	Мин	$R_{В-}$	2,03	1,95
	Сред	$R_{В}$	2,68	2,68
	Макс	$R_{В+}$	3,43	3,56
Реактивное сопротивление обмотки ВН в положениях РПН, Ом	Мин	$X_{В-}$	20,07	19,15
	Сред	$X_{В}$	28,04	28,04
	Макс	$X_{В+}$	49,82	49,50
Активное сопротивление обмотки НН в положениях РПН, Ом	Мин	$R_{Н-}$	4,06	3,90
	Сред	$R_{Н}$	5,36	5,36
	Макс	$R_{Н+}$	6,87	7,13
Реактивное сопротивление обмотки НН в положениях РПН, Ом	Мин	$X_{Н-}$	201,10	201,72
	Сред	$X_{Н}$	260,48	260,48
	Макс	$X_{Н+}$	315,79	326,73
Полное сопротивление трансформатора в положениях РПН, Ом	Мин	$Z_{Т-}$	221,26	220,94
	Сред	$Z_{Т}$	288,63	288,63
	Макс	$Z_{Т+}$	365,75	366,39

Аналогичным образом получим выражения для напряжения КЗ при распаралеленных обмотках в абсолютных и относительных единицах:

$$U_{KBH1\pm} = \frac{U_{KBH1}}{(Z_B + Z_{H1})} \left[Z_B \left(1 \pm \frac{\Delta U_{РПН}^{\%}}{100} \right) + Z_{H1} \right]; \quad (29)$$

$$U_{KBH1\pm}^{\%} = \frac{U_{KBH1}^{\%}}{(Z_B + Z_{H1})} \left[Z_B \left(1 \pm \frac{\Delta U_{РПН}^{\%}}{100} \right) + Z_{H1} \right], \quad (30)$$

где $U_{KBH1\pm}$ – напряжение короткого замыкания в положениях РПН при распаралеленных обмотках НН (знак минус соответствует максимальному напряжению обмотки ВН, минус – минимальному).

Выражения (27) – (30) устанавливают взаимосвязь между напряжениями КЗ в нулевых и крайних положениях РПН, а также в любых промежуточных, в зависимости от выбранной величины $\Delta U_{РПН}$. Так как параметры обмотки НН, как отмечалось ранее, неизменны, то значения напряжения короткого замыкания между обмотками НН1 и НН2 в любом положении РПН будут так же неизменны, следовательно, вывод отдельной формулы для его вычисления не требуется. При необходимости его расчета можно воспользоваться выражением (14).

Аналогичным образом на основании (18) запишем систему уравнений для режимов работы трансформатора в нулевом и крайних положениях РПН, при этом для режимов РПН сразу выразим из формулы значение потерь:

$$\begin{cases} R_B = \frac{\Delta P_K U_{BH}^2}{2 S_H^2}; \\ \Delta P_{K\pm} = \frac{2 S_H^2}{U_{BH}^2} \left(1 \pm \frac{\Delta U_{РПН}^{\%}}{100} \right) R_B. \end{cases} \quad (31)$$

Исходя из (18) и (20), а именно равенства сопротивлений обмотки ВН и запаралеленных обмоток НН, второе уравнение системы (31) можно записать иначе:

$$\Delta P_{K\pm} = \frac{S_H^2}{U_{BH}^2} \left(1 \pm \frac{\Delta U_{РПН}^{\%}}{100} \right) R_B + \frac{S_H^2 R_B}{U_{BH}^2} = \frac{S_H^2}{U_{BH}^2} \left(1 \pm \frac{\Delta U_{РПН}^{\%}}{100} \right) R_B + \frac{\Delta P_K}{2}, \quad (32)$$

первое слагаемое которого представляет собой потери в обмотке ВН, а второе – в обмотках НН.

Далее, подставляя первое уравнение системы (31) в (32) и выполнив приведение, получим формулу для пересчета потерь короткого замыкания в трансформаторе в крайних положениях РПН:

$$\Delta P_{K\pm} = \frac{\Delta P_K}{2} \left[1 + \left(1 \pm \frac{\Delta U_{РПН}^{\%}}{100} \right) \right]. \quad (33)$$

Аналогичным образом можно получить формулу для расчета потерь холостого хода в крайних положениях РПН. Учитывая, что в опыте холостого хода обмотка НН разомкнута и потери в ее меди отсутствуют, формула будет иметь вид:

$$\Delta P_{XX\pm} = \left(1 \pm \frac{\Delta U_{РПН}^{\%}}{100} \right) \Delta P_{XX}. \quad (34)$$

Таким же образом возможно пересчитать ток холостого хода:

$$I_{XX\pm} = \left(1 \pm \frac{\Delta U_{РПН}^{\%}}{100} \right) I_{XX}. \quad (35)$$

Метод 2. Пересчет параметров трансформатора с учетом устройства РПН в обмотке ВН по данным завода-изготовителя

Основные расчетные формулы были получены в разделе 1. Здесь и далее приводятся расчетные

формулы для определения напряжения обмотки ВН в положениях РПН, напряжений короткого замыкания и потерь короткого замыкания.

Напряжение обмотки ВН для произвольного положения РПН рассчитывается по формуле:

$$U_{BH} = U_{BH.H} \left(1 + \frac{\pm n_m \alpha}{100} \right), \quad (36)$$

где $U_{BH.H}$ – номинальное напряжение ВН трансформатора, кВ; n_m – текущее расчетное положение РПН. Значение ноль соответствует среднему положению РПН; α – шаг ступени РПН, % на ступень:

$$\alpha = \frac{\Delta U_{РПН}^{\%}}{n}. \quad (37)$$

Для положительного положения РПН напряжения КЗ рассчитываются по формулам:

$$U_{KBH}^{\%} = U_{KBH.H}^{\%} + \frac{n_m}{n} (U_{KBH+}^{\%} - U_{KBH.H}^{\%}); \quad (38)$$

$$U_{KBH1}^{\%} = U_{KBH1.H}^{\%} + \frac{n_m}{n} (U_{KBH1+}^{\%} - U_{KBH1.H}^{\%}), \quad (39)$$

где $U_{KBH+}^{\%}$ и $U_{KBH1+}^{\%}$ – напряжения КЗ в крайнем положительном положении РПН; $U_{KBH.H}^{\%}$ и $U_{KBH1.H}^{\%}$ – напряжения КЗ в среднем положении РПН.

Для отрицательного положения РПН напряжения КЗ рассчитываются по формулам:

$$U_{KBH}^{\%} = U_{KBH.H}^{\%} - \frac{n_m}{n} (U_{KBH.H}^{\%} - U_{KBH-}^{\%}); \quad (40)$$

$$U_{KBH1}^{\%} = U_{KBH1.H}^{\%} - \frac{n_m}{n} (U_{KBH1.H}^{\%} - U_{KBH1-}^{\%}), \quad (41)$$

где $U_{KBH-}^{\%}$ и $U_{KBH1-}^{\%}$ – напряжения КЗ в крайнем отрицательном положении РПН.

Напряжения для расчета уравнений (38) – (41) могут быть либо взяты из паспортных данных по соответствующему ГОСТ на трансформаторы, либо получены расчетным путем в предыдущем разделе.

Для положительного положения РПН потери КЗ определяются как:

$$\Delta P_K = \Delta P_{KH} + \frac{n_m}{n} (\Delta P_{K+} - \Delta P_{KH}), \quad (42)$$

где P_{KH} – номинальные потери КЗ трансформатора в среднем положении РПН, кВт; P_{K+} – потери КЗ трансформатора в крайнем положительном положении РПН, кВт.

Для отрицательного положения РПН потери КЗ определяются как:

$$\Delta P_K = \Delta P_{KH} - \frac{n_m}{n} (\Delta P_{KH} - \Delta P_{K-}), \quad (43)$$

где P_{K-} – потери КЗ трансформатора в крайнем отрицательном положении РПН, кВт.

Аналогично (42) и (43) определяются потери холостого хода для положительного и отрицательного положения РПН:

$$\Delta P_{XX} = \Delta P_{XX.H} + \frac{n_m}{n} (\Delta P_{XX+} - \Delta P_{XX.H}); \quad (44)$$

$$\Delta P_{XX} = \Delta P_{XX.H} - \frac{n_m}{n} (\Delta P_{XX.H} - \Delta P_{XX-}), \quad (45)$$

где $P_{XX.H}$ – номинальные потери холостого хода трансформатора в среднем положении РПН, кВт; P_{XX+} , P_{XX-} – потери холостого хода трансформатора в крайних положительном и отрицательном положениях РПН соответственно, кВт.

Пример расчета параметров трансформатора

По рассмотренным методикам был произведен расчет параметров трансформатора типа ТРДН–40000/220/6,3 для среднего и крайних положений РПН в режиме раздельной работы обмоток НН. Исходные данные для расчетов параметров приведены в табл. 1, где паспортные данные взяты из [19, 20]. Расчетные данные напряжений короткого

замыкания и потерь по паспортным значениям напряжения короткого замыкания в среднем положении РПН и диапазону регулирования РПН приведены в табл. 2, а в табл. 3 приведены результаты расчетов параметров схемы замещения.

Как можно видеть из таблицы 3, разница в значениях параметров схемы замещения трансформатора с расщепленной обмоткой с учетом наличия устройства РПН, полученных обоими предложенными методами, в среднем составляет 1,6 %, а максимальное расхождение не превышает 5 %, что говорит о высокой точности и достоверности расчетного метода.

Заключение

Оценивая полученные результаты, можно отметить, что, даже имея минимальный набор заводских исходных данных об испытаниях трансформатора с расщепленной обмоткой, можно достаточно легко рассчитать его параметры, учитывая при этом наличие устройства РПН. Для расчета достаточно знать напряжения короткого замыкания для двух любых пар обмоток в среднем положении РПН, потери короткого замыкания в среднем положении РПН, а также диапазон и число ступеней регулирования РПН, остальные параметры рассчитываются по приведенным в статье формулам.

Полученные результаты позволяют выполнять практические расчеты режимов работы трансформаторов и могут быть полезны в инженерной практике. Дальнейшим развитием методов, приложенных в данной работе, является их модификация для трехобмоточного трансформатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 296 с.
2. A.Y. Shklyarskiy and A.I. Bardanov, "Test of the method for calculation of derating of workshop transformers on engineering plants," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 177, p. 012054, Feb. 2017.
3. Анхель Оскар Колумбия Наварро. Эквивалентирование электрической сети при наличии высших гармоник / Анхель Оскар Колумбия Наварро, Я.Э. Шклярский, А.Н. Скамьян // Записки Горного института. – 2015. – Т. 213. – С 31-35.
4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.
5. Ананичева С.С. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: учебное

пособие / С.С. Ананичева, А.Л. Мызин; 6-е изд., испр. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 80 с.

6. Костенко М.П. Электрические машины: учебник для вузов: в 2 ч. Ч.1: Машины постоянного тока. Трансформаторы / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1972. – 543 с.

7. Справочник по проектированию электрооборудования / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

8. Eremia M. Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control / Mircea Eremia, Mohammad Shahidehpour. – John Wiley & Sons, 2013. – 976 p.

9. B. de Metz-Noblat. Calculation of short-circuit currents / B. de Metz-Noblat, F. Dumas, C. Poulain // Cahier Technique Schneider Electric. – № 158.

10. Shaarbafi K. Transformer Modelling Guide: Revision 2. – Teshmont, 2014. – 304 p.

11. Asad Ahmad. Power Transformer Transient Modeling Considering the Effects of On-Load Tap Changer / Asad Ahmad, Wanliang Fang, Jun Liu, Xudong Hao // 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), October 2017. – P. 766-770.

12. On-load tap-changers, type UC. Technical guide. – ABB, 2016. – 80 p.

13. Krämer A. On-Load Tap-Changers for Power Transformers. – Spintler - Medienhaus Weiden, 2000.

14. Chao Gao. Voltage Control in Distribution Networks using On-Load Tap Changer Transformers. Doctor of Philosophy Thesis. – University of Bath, 2013. – 241 p.

15. Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учебное пособие для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев и др.; под ред. И.П. Крюčkova, В.А. Старшинова. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 568 с.

16. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования РД 153-34.0-20.527-98. / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.

17. Бики М.А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчет основных параметров. – М.: Знак, 2013. – 513 с.

18. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – М.: Альянс, 2013. – 528 с.

19. ГОСТ 17544-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 220, 330, 500 и 750 кВ. Технические условия. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам.

20. Трансформатор типа ТРДНС–63000/220-УХЛ1 № 25801. Паспорт ВЕИЮ.672638.056-01 ПС. – ООО «Тольяттинский Трансформатор».

Alexander V. Gerasimuk¹, Design Engineer, **Irina Y. Semykina**², Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Mikhail V. Kipervasser**³, C. Sc. in Engineering, Associate Professor

¹ "SIBERIAN TYAZHPROMELEKTROPROJEKT" Joint Stock Company, 5 Ordzhonikidze, Novokuznetsk, 654006, Russian Federation

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

³ Siberian State Industrial University, 42 Kirova, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

CALCULATION OF EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS FOR A SPLIT-WINDING TRANSFORMER TAKING INTO ACCOUNT AN ON-LOAD TAP-CHANGER IN A HIGHER-VOLTAGE WINDING

Abstract: The authors propose a method aimed at calculation of equivalent circuit parameters for a split-winding transformer that takes into account an on-load tap-changer in a higher-voltage winding. There are detailed derivation of basic dependencies and formulas in the article, founding the proposed method. The text presents the modifications of transformer parameters recounting procedure for middle and limit positions of the on-load tap-changer in case of using as an input data short-circuit test and no-load test of a transformer provided by its producer and in case of partial absence of such information. The transformer resistances have been calculated for limit and zero positions of the on-load tap-changer in two ways: the first is based on certified value of short-circuit voltage at limit positions of the on-load tap-changer; the second one uses calculations relayed on the linear dependence between short-circuit voltage and regulating range of the on-load tap-changer. The transformer resistances have been calculated for limit and zero positions of the on-load tap-changer in two ways: the first one puts to use the certified value of short-circuit voltage at limit positions of the on-load tap-changer; the second one uses calculations relayed on the linear dependence between short-circuit voltage and a regulating range of the on-load tap-changer. The final part of the article contains a comparative analysis of the obtained results and conclusions about the accuracy of the proposed method.

Keywords: transformer, split-winding, equivalent circuit, on-load tap-changer.

Article info: received June 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-2-52-59

REFERENCES

1. M.A. Shabad "Raschety releinoi zaschity i avtomatiki raspredelitelnyh setei" [Calculations of relay protection and automation of distribution networks], Moscow, Kniga po Trebovaniyu, 2013, 296 p. (rus)
2. A.Y. Shklyarskiy and A.I. Bardanov, "Test of the method for calculation of derating of workshop transformers on engineering plants," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 177, p. 012054, Feb. 2017.
3. Anhel Oskar Kolumbiya Navarro, A.Y. Shklyarskiy, A.N. Skamyin "Ekvivalentirovanie elektricheskoi seti pri nalichii vysshih garmonik" [Electric network equivalenting in the presence of high harmonics] Journal of Mining Institute, 2015, Vol. 213, pp. 31-35. (rus)
4. "Rukovodystvie ukazaniya po releinoi zaschite. Vyp. 11. Raschety tokov korotkogo zamykaniya dlya releinoi zaschity i sistemnoi avtomatiki v setyah 110-750 kV" [Relay Protection Guidelines. Issue 11. Calculations of short-circuit currents for relay protection and system automation in 110-750 kV networks], Moscow, Energiya, 1979, 152 p. (rus)
5. S.S. Ananicheva, A.L. Myzin "Shemy zameshcheniya i ustanovivshiesya rejimy elektricheskikh setei: uchebnoe posobie" [Substitution schemes and steady-state modes of electrical networks: a tutorial], Yekaterinburg, Ural Federal University, 2012, 80 p. (rus)
6. M.P. Kostenko, L.M. Piotrovskii "Elektricheskie mashiny: uchebnyk dlya vuzov v 2 ch. Ch. I: Mashiny postoyannogo toka. Transformatory" [Electrical machines: a textbook for universities in two parts. Part I: DC machines. Transformers] Leningrad, Energiya, 1972, 543 p. (rus)
7. Yu.G. Barybin and others "Spravochnik po proektirovaniyu elektrosnabzheniya" [Handbook for the design of power supply], Moscow, Energoatomizdat, 1990, 576 p. (rus)
8. Mircea Eremia, Mohammad Shahidehpour "Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control," John Wiley & Sons, 2013, 976 p.
9. B. de Metz-Noblat, F. Dumas, C. Poulain "Calculation of short-circuit currents," Cahier Technique Schneider Electric, No. 158.
10. K. Shaarbafi "Transformer Modelling Guide: Revision 2," 2014, 304 p.
11. Asad Ahmad, Wanliang Fang, Jun Liu, Xudong Hao "Power Transformer Transient Modeling Considering the Effects of On-Load Tap Changer," 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), October 2017, pp. 766-770.
12. "On-load tap-changers, type UC. Technical guide," ABB, 2016, 80 p.
13. A. Krämer "On-Load Tap-Changers for Power Transformers," Spintler - Medienhaus Weiden, 2000.
14. Chao Gao "Voltage Control in Distribution Networks using On-Load Tap Changer Transformers. Doctor of Philosophy Thesis," University of Bath, 2013, 241 p.
15. I.P. Kryuchkov, V.A. Starshinov, Yu.P. Gusev and others "Korotkie zamykaniya i vybor elektrooborudovaniya: uchebnoe posobie dlya vuzov" [Short circuits and the choice of electrical equipment: a textbook

for universities], Moscow, Publishing House MEI, 2017, 568 p. (rus)

16. RD 153-34.0-20.527-98 “Rukovodyaschie ukazaniya po raschetu tokov korotkogo замы-kaniya i vyboru elektrooborudovaniya” [Guidelines for the calculation of short-circuit currents and the choice of electrical equipment], Moscow, NC ENAS, 2002, 152 p. (rus)

17. M.A. Biki “Proektirovanie silovyh transformatorov. Raschet osnovnyh parametrov” [Design of power transformers. Calculation of the main parameters], Moscow, Znak, 2013, 513 p. (rus)

18. P.M. Tihomirov “Raschet transformatorov: Uchebnoe posobie dlya vuzov” [Calculation of

transformers: a textbook for universities], Moscow, Al'yans, 2013, 528 p. (rus)

19. GOST 17544-85 “Transformatory silovye maslyanye obshchego naznacheniya klassov napryazheniya 220, 330, 500 i 750 kV. Tehnicheskie usloviya” [General-purpose oil-immersed power transformers on voltages 220, 330, 500 and 750 kV. Full product specifications], Moscow, USSR State Committee on Standards. (rus)

20. VEIYu.672638.056-01 PS “Transformator tipa TRDNS–63000/220-UHL1 № 25801. Pasport” [TRDNS–63000/220-UHL1 transformer passport], Tol'yatti Transformer LLC. (rus)

Библиографическое описание статьи

Герасимук А.В., Семькина И.Ю., Кипервассер М.В. Расчет параметров схемы замещения трансформаторов с расщепленной обмоткой с учетом устройства регулирования напряжения под нагрузкой в обмотке высшего напряжения // Горное оборудование и электромеханика — 2019. — № 2 (142). — С. 52-59.

Reference to article

Gerasimuk A.V., Semykina I.Y., Kipervasser M.V. Calculation of equivalent circuit parameters for a split-winding transformer taking into account an on-load tap-changer in a higher-voltage winding. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 2 (142), pp. 52-59.