

УДК 621.314.21

РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ РАСЧЁТА ТРАНСФОРМАТОРА С КОРОТКОЗАМКНУТОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКОЙ

А.В. Сериков, В.М. Кузьмин

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

E-mail: kem@knastu.ru

Представлена конструкция нагревательного элемента трансформаторного типа с короткозамкнутой кольцевой вторичной обмоткой. Описаны особенности электромагнитного и теплового расчётов этого устройства. Приведены результаты проектирования трансформатора мощностью 25 кВт. Установлено, что в качестве материала вторичной обмотки целесообразно использовать алюминиевый сплав АМГ5М. С использованием метода планирования эксперимента даны рекомендации для проектирования трансформаторов минимальной стоимости мощностью от 10 до 160 кВт.

Ключевые слова:

Нагревательный элемент трансформаторного типа, электромагнитный расчёт, тепловой расчёт, планирование эксперимента.

Key words:

Transformer type heating element, electromagnetic calculation, thermal calculation, method of planning an experiment.

Проблемы безопасности и надёжности электродонагревательных устройств для децентрализованных систем теплообеспечения и горячего водоснабжения являются актуальными. Традиционные трубчатые нагревательные элементы, используемые в этих устройствах, обладают рядом недостатков, ограничивающих срок службы и уменьшающих безопасность всей системы.

Разрабатываемые в настоящее время электроотопительные устройства трансформаторного типа [1] выгодно отличаются от традиционных высоким уровнем электро- и пожаробезопасности, обладают малой тепловой инерцией и большим сроком службы. Конструкция таких устройств имеет много общего с конструкцией традиционных силовых трансформаторов, что даёт возможность организовать их производство на существующих предприятиях трансформаторостроения без значительных дополнительных капиталовложений. Одной из возможных конструкций на базе трансформатора с плоской трёхстержневой магнитной системой является нагревательный элемент с короткозамкнутой кольцевой вторичной обмоткой, которая представляет собой полые электрически замкнутые кольца – 1 (рис. 1), по внутренней полости которых пропускается нагреваемая вода. Кольца имеют патрубки для входа и выхода воды и concentрически охватывают стержень – 2 с первичной обмоткой – 3. С целью снижения расхода материалов и уменьшения габаритов нагревательного элемента кольца следует выполнять с прямоугольным сечением.

Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей расчёта таких устройств, а также получение рекомендаций для проектирования трансформатора с наилучшими массогабаритными и стоимостными показателями.

За основу расчёта принята методика проектирования трёхфазного силового двухобмоточного сухого трансформатора с плоской стержневой магнитной системой [2], которая включает в себя вы-

бор исходных данных, определение основных электрических величин и размеров трансформатора, расчёт первичной и вторичной обмоток, окончательный расчёт магнитной системы, определение параметров холостого хода, тепловой и экономический расчёты.

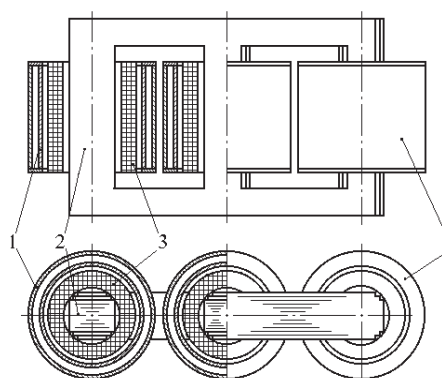


Рис. 1. Трансформатор с кольцевой короткозамкнутой обмоткой

При определении основных электрических величин и размеров трансформатора по известным формулам [2] вычисляются ток первичной обмотки, ЭДС витка, активное сечение и диаметр стержня, а также предварительно определяется высота первичной обмотки по формуле:

$$l = \frac{\pi d_{12}}{\beta},$$

где d_{12} – средний диаметр витков первичной и вторичной обмоток; β – отношение средней длины витков первичной и вторичной обмоток к высоте первичной обмотки.

Расчёт первичной обмотки включает в себя выбор провода, распределение витков катушки по слоям, определение размеров многослойной цилиндрической обмотки, её массы, потерь в ней, и уточняется ЭДС витка E_b по формуле:

$$E_b = \frac{U_{1\phi} - I_{1\phi} r_1}{w_1},$$

где $U_{1\phi}$, $I_{1\phi}$, r_1 , w_1 – фазное напряжение, ток, активное сопротивление и число витков в первичной обмотке, соответственно.

Основной особенностью проектирования нагревательного элемента трансформаторного типа (НЭТ) является расчёт вторичного короткозамкнутого контура, который обеспечивает необходимую мощность тепловыделений. Радиальные и осевые геометрические размеры должны быть привязаны к соответствующим размерам первичной обмотки. Толщина стенок кольцевой обмотки δ , подбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимое активное сопротивление и, следовательно, заданную мощность тепловыделений P_2 , определяемую по формуле:

$$P_2 = mE_b^2 \left(\frac{1}{R_{2в}} + \frac{1}{R_{2н}} + \frac{2}{R_{2т}} \right),$$

где m – число фаз; $R_{2в}$, $R_{2н}$ – активные сопротивления внутренней и наружной стенок кольца; $R_{2т}$ – активное сопротивление торцевой части кольцевой камеры вторичной обмотки.

Методики окончательного расчёта магнитной системы и определения параметров холостого хода ничем не отличаются от соответствующих методик расчёта силового трансформатора [2].

При оценке теплового состояния была составлена соответствующая схема замещения для среднего по высоте сечения стержня (рис. 2). Рассматривался наиболее нагруженный режим работы, когда все потери идут на нагрев воды, находящейся в кольцеобразной камере (теплоизолированный корпус). Тепловые сопротивления и коэффициент теплоотдачи определялись по известным методикам и формулам [3].

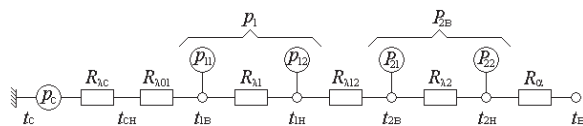


Рис. 2. Тепловая схема замещения

Здесь p_c , p_1 – потери в магнитопроводе и первичной обмотке; $P_{2в}$ – мощность тепловыделений во внутреннем цилиндре кольца вторичной обмотки; $R_{1с}$, R_{101} , R_{11} , R_{112} , R_{12} – тепловые сопротивления (ТС) теплопроводности стержня магнитопровода, между стержнем и первичной обмоткой, первичной обмотки, между первичной и вторичной обмотками, внутреннего цилиндра вторичной обмотки, соответственно; R_a – ТС теплоотдачи с поверхности внутреннего цилиндра кольцеобразной камеры; t_c , $t_н$ – температуры внутри и на поверхности стержня; $t_{1в}$, $t_{1н}$ – температуры внутренней и наружной частей первичной обмотки; $t_{2в}$, $t_{2н}$ – температуры на внутренней и наружной поверхностях внутреннего цилиндра кольца вторичной обмотки.

Экономический расчёт включает в себя определение масс и ориентировочную стоимость актив-

ных материалов $C_{акт}$. Особенностью является то, что для сравнения различных вариантов расчёта удобно выразить стоимость в условных единицах с помощью коэффициентов $k_{1с}$ и $k_{2с}$, которые определяют отношение стоимости 1 кг материалов первичной и вторичной обмоток, соответственно, к стоимости 1 кг электротехнической стали. Таким образом, значение $C_{акт}$ в условных единицах при расчётах можно оценить по следующей формуле:

$$C_{акт} = G_{ст} + k_{1с} G_1 + k_{2с} G_2,$$

где $G_{ст}$, G_1 , G_2 – массы электротехнической стали, обмоточного провода и материала вторичной обмотки.

Таблица 1. Результаты электромагнитного расчёта

Величина, единица измерения	Обозначение	Результат	
		1 вариант	2 вариант
Фазный ток первичной обмотки, А	$I_{1\phi}$	38,7	38,7
Диаметр стержня, м	d	0,057	0,080
Высота первичной обмотки, м	l	0,272	0,221
Внутренний диаметр первичной обмотки, м	$D_{1в}$	0,061	0,084
Наружный диаметр первичной обмотки, м	$D_{1н}$	0,142	0,133
Полные потери в первичной обмотке, Вт	p_1	696,5	359,4
ЭДС витка, В	E_b	0,75	1,50
Число витков	w_1	286	145
Мощность тепловыделений во вторичной обмотке, кВт	P_2	24,44	24,48
Толщина стенки кольца, мм	δ	1,03	2,98
Внутренний диаметр кольца, м	$D_{2в}$	0,146	0,137
Наружный диаметр кольца, м	$D_{2н}$	0,170	0,169
Удельная поверхностная мощность, Вт/см ²	W_n	3,32	4,27
Геометрический коэффициент	β	1,34	1,80
Длина стержня, м	l_c	0,302	0,251
Расстояние между осями стержней, м	C	0,172	0,171
Потери холостого хода, Вт	P_x	49,4	96,0
Масса первичной обмотки, кг	G_1	20,6	11,2
Масса колец (вторичной обмотки), кг	G_2	2,34	15,5
Масса электротехнической стали, кг	$G_{ст}$	29,5	54,5
Стоимость активных материалов, у.е.	$C_{акт}$	61,50	90,49

В работе выполнены электромагнитные расчёты серии нагревательных элементов мощностью от 10 до 160 кВт. В табл. 1 приведены результаты расчёта трансформатора мощностью 25 кВт с короткозамкнутой вторичной обмоткой, выполненной из алюминиевого сплава АМГ5М и с первичной обмоткой из алюминиевого прямоугольного провода марки АПСДК (1 вариант), а также результаты расчёта для вторичной обмотки из нержавеющей немагнитной стали марки 08Х18Н10Т (2 вариант). Оба варианта соответствуют минимальной стоимости активных материалов. Схема соединения первичной обмотки – звезда. Величина фазно-

го напряжения – 220 В. Электромагнитные нагрузки принимались одинаковыми для двух вариантов: плотность тока в первичной обмотке – 1,39 А/мм²; индукция в стержне магнитопровода – 1,52 Тл.

Тепловое состояние оценивалось при средней температуре нагреваемой воды 77,5 °С и расходе 24,4 л/мин. При этом температура воды на входе в нагревательный элемент задавалась 70 °С (максимально допустимая в обратном трубопроводе в случае с недостаточной площадью теплообменных аппаратов при использовании в автономной системе теплоснабжения), а на выходе 85 °С. Коэффициенты теплопроводности материалов выбраны по [4] и имеют значения, приведённые в табл. 2. При температуре теплоотдающей поверхности более 100 °С возникает кипение. В этом случае коэффициент теплоотдачи определялся по формуле:

$$\alpha = \frac{44(t_{2н} - 100)^3}{t_{2н} - t_{в}} + \alpha_{к},$$

где $\alpha_{к}$ – коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции без учёта кипения, определяемый по [3].

Таблица 2. Коэффициенты теплопроводности элементов конструкции трансформатора

Элемент конструкции	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Стержень магнитопровода	4,00
Первичная обмотка поперёк провода	1,01
Изоляция катушки	0,18
Вторичная обмотка	100,00

Результаты теплового расчёта по схеме замещения для трансформатора мощностью 25 кВт (рис. 3) показывают, что для таких устройств необходимо использовать изоляционные материалы класса нагрывостойкости Н.

С целью получения рекомендаций для проектирования трансформаторов минимальной стоимости в работе исследовано влияние числа витков в первичной обмотке w_1 и геометрического коэффициента β на стоимость активных материалов $C_{акт}$, толщину листа вторичного контура δ , температуру изоляции $t_{из}$ и плотность теплового потока от вторичной обмотки в воду $W_{п}$. Коэффициент β так же, как и в традиционных силовых трансформаторах определяет соотношение между диаметром и высотой обмотки и для исследуемого устройства определяется по формуле:

$$\beta = \frac{\pi d_{12}}{l} = \frac{\pi(D_{1в} + D_{2н})}{2l},$$

где d_{12} – средний диаметр первичной и вторичной обмоток; l – высота первичной обмотки; $D_{1в}$ – внутренний диаметр первичной обмотки; $D_{2н}$ – наружный диаметр вторичной обмотки.

Математические модели, которые связывают функции цели $C_{акт}$, δ , $t_{из}$ и $W_{п}$ с факторами w_1 и β определены с помощью метода планирования экс-

перимента на основе ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) второго порядка, что позволяет получить достаточно точные аппроксимирующие выражения в виде полиномов второй степени [5]. Очень важным моментом является выбор интервалов варьирования переменных факторов w_1 и β , так как от этого зависят в значительной степени результаты эксперимента и точность моделей. Задача осложняется тем, что число витков в первичной обмотке не может быть дробным, а уточнённый в результате расчётов коэффициент β может отличаться от предварительно заданного значения. Это объясняется тем, что геометрический коэффициент определяется размерами первичной обмотки, которые зависят от распределения витков по слоям. Число витков в слое не может быть дробным значением.

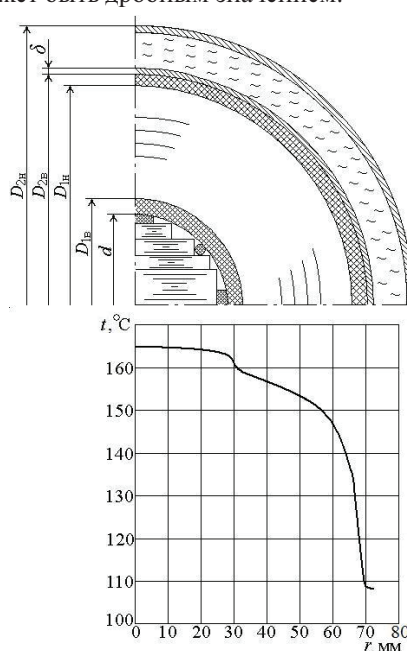


Рис. 3. Распределение температуры в среднем сечении

С целью определения интервалов варьирования для w_1 и β проведена серия предварительных расчётов. В каждом расчёте плотность тока в первичной обмотке выбиралась так, чтобы температура изоляции соответствовала классу нагрывостойкости Н. Так же накладывались ограничения по выбору числа витков. ЭДС витка не должна превышать безопасного значения 2 В. Другие ограничения при расчёте не ставились, т. к. распространять требование обеспечения заданных значений напряжения короткого замыкания и тока холостого хода на трансформаторы данного класса нецелесообразно.

В экономическом расчёте учитывались цены на прямоугольный алюминиевый обмоточный провод марки АПСДК сечением 27,9 мм² (147 р/кг) [6], алюминиевый сплав АМГ5М (179 р/кг) [7], электротехническую сталь 3413 (108 р/кг) и нержавеющей немагнитную сталь 08Х18Н10Т (145 р/кг) [8].

Результаты предварительных исследований показывают, что зависимости $C_{акт} = f(w_1)$ и $C_{акт} = f(\beta)$

имеют минимумы. Значения w_1 и β , при которых наблюдаются минимальные величины $C_{акт}$, принимаются за нулевой уровень варьирования факторов, табл. 3.

По результатам расчётов в соответствии с ОЦКП второго порядка для трансформатора мощностью 25 кВт определены коэффициенты полиномов для стоимости активных материалов $C_{акт}$, толщины вторичной обмотки δ , температуры изоляции $t_{из}$, плотности теплового потока с поверхности вторичной обмотки $W_{п}$ и получены следующие выражения в кодированной системе координат:

$$C_{акт} = 60,52 + 5,04w_1 + 2,25\beta + 4,38w_1\beta + 6,28w_1^2 + 1,33\beta^2;$$

$$\delta = 1,17 + 0,92w_1 + 0,44\beta + 0,33w_1\beta + 0,23w_1^2 + 0,02\beta^2; (*)$$

$$t_{из} = 168,5 + 18,8w_1 + 19,5\beta + 7,8w_1\beta + 3,4w_1^2 + 0,98\beta^2;$$

$$W_{п} = 3,52 - 0,41w_1 + 0,29\beta - 0,19w_1\beta - 0,1w_1^2 - 0,14\beta^2.$$

Таблица 3. Уровни варьирования факторов

Переменные факторы	Уровни варьирования				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Число витков в первичной обмотке w_1	200	200	300	400	400
Геометрический коэффициент β	1,0	1,0	1,4	1,8	1,8
$\alpha=1$ – «звёздная точка» для двухфакторного ОЦКП второго порядка					

По результатам эксперимента в факторном пространстве построена поверхность отклика для зависимости $C_{акт} = f(w_1, \beta)$ (рис. 4), которая имеет точку экстремума $C_{акт\ min}$ с координатами в кодированной системе $w_{1\ min} = -0,25$ и $\beta_{\ min} = -0,43$. Им соответствуют истинные значения факторов $w_{1\ min} = 275$ витков и $\beta_{\ min} = 1,228$.

С целью получения рекомендаций по выбору исходных данных при расчёте трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой, по полиномам (*) были построены зависимости $C_{акт} = f(w_1)$, $\delta = f(w_1)$ и $t_{из} = f(w_1)$ при условии $\beta = \beta_{\ min}$ (рис. 5, а), а также зависимости $C_{акт} = f(\beta)$, $\delta = f(\beta)$ и $t_{из} = f(\beta)$ при $w_1 = w_{1\ min}$ (рис. 5, б).

Анализ полученных графиков показывает, что функции для стоимости активных материалов имеют минимумы, которые определяют рекомендации по выбору w_1 и β . Ограничивающими условиями

являются температура изоляционных материалов $t_{из}$ и толщина вторичной обмотки δ , которая по технологическим и механическим условиям не может быть менее 1 мм. В результате поиска возможных вариантов по ур. (*) выявлено, что для трансформатора мощностью 25 кВт число витков в первичной обмотке рекомендуется выбирать в пределах 280...340, а β – в пределах 1,00...1,37. Причём меньшим значениям w_1 соответствуют большие значения β . В этих случаях стоимость активных материалов не превышает минимальную стоимость более чем на 5 %.

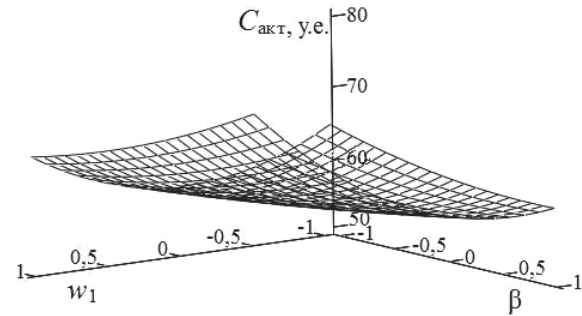


Рис. 4. Поверхность отклика для НЭТ мощностью 25 кВт

Для получения рекомендаций по выбору исходных данных w_1 и β при расчётах трансформаторов других мощностей также были получены зависимости $C_{акт} = f(w_1, \beta)$, $\delta = f(w_1, \beta)$, $t_{из} = f(w_1, \beta)$ и $W_{п} = f(w_1, \beta)$ в виде полиномов второй степени с использованием метода планирования эксперимента. По этим выражениям выполнен поиск наилучшего варианта, соответствующего минимальной стоимости активных материалов с учётом следующих ограничений.

1. Толщина стенки кольца вторичной обмотки не должна быть меньше 1 мм по технологическим соображениям ($\delta \geq 1$ мм).
2. Температура изоляции должна соответствовать классу нагревостойкости Н ($t_{из} \leq 165$ °С).
3. Плотность теплового потока с теплоотдающей поверхности вторичной обмотки по условиям образования накипи не должна превышать 10 Вт/см² ($W_{п} \leq 10$ Вт/см²).

Поиск проводился для двух вариантов. В первом варианте ограничения не накладывались,

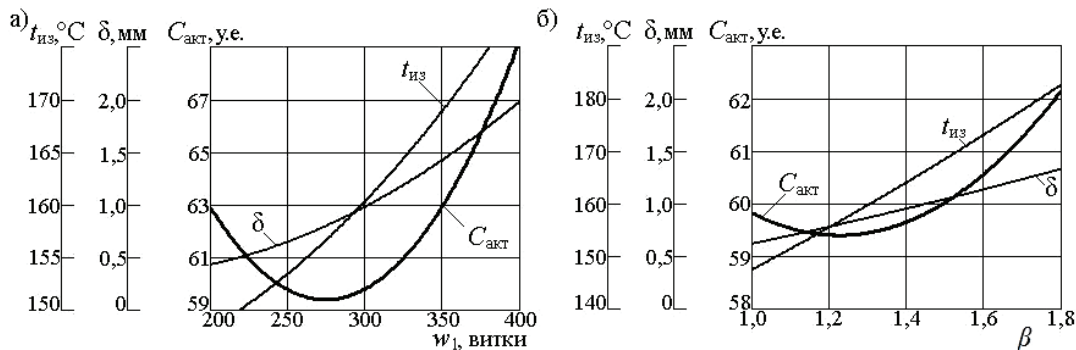


Рис. 5. Результаты исследований для НЭТ мощностью 25 кВт

Таблица 4. Результаты поиска

Расчётная величина	Мощность, кВт						
	10	16	25	40	63	100	160
Без учёта ограничений (1 вариант)							
$C_{акт\ min}$, у. е.	35,17	47,30	59,40	80,44	113,63	152,26	215,55
$w_{1\ min}$, витки	358	300	275	237	182	150	132
β_{min}	1,62	1,39	1,23	1,00	1,05	1,02	0,78
δ , мм	0,76	0,73	0,80	0,78	0,80	0,85	0,70
$t_{из}$, °C	158,0	159,8	156,7	157,4	171,8	182,2	189,6
$W_{п}$, Вт/см ²	2,13	2,51	3,45	3,96	5,34	6,72	7,95
С учётом ограничений (2 вариант)							
Сакт, у. е.	35,68 (1,5*)	49,42 (4,5)	59,77 (0,6)	81,07 (0,8)	119,68 (5,3)	164,21 (7,8)	244,57 (13,5)
w_1 , витки	393 (9,8)	351 (17,0)	286 (4,0)	263 (11,0)	240 (31,9)	217 (44,7)	230 (74,2)
β	1,73 (6,8)	1,33 (4,3)	1,36 (10,6)	1,00 (0,0)	0,72 (31,4)	0,57 (32,9)	0,31 (60,3)
Результаты электромагнитного расчёта с учётом ограничений							
$C_{акт}$, у. е.	36,44 (2,1**)	50,27 (1,7)	61,61 (3,0)	79,99 (1,4)	119,45 (0,2)	167,81 (2,1)	242,42 (0,9)
w_1 , витки	397 (1,0)	361 (2,8)	281 (1,8)	263 (0,0)	247 (2,8)	220 (1,4)	233 (1,3)
β	1,67 (3,6)	1,29 (3,1)	1,34 (1,5)	0,98 (2,0)	0,69 (4,3)	0,55 (3,6)	0,31 (0,0)

В скобках – отличия от соответствующих значений 1-го (*) и 2-го (**) вариантов расчёта, в %.

то есть осуществлялся поиск абсолютной минимальной стоимости активных материалов $C_{акт\ min}$ и соответствующие значения $w_{1\ min}$ и β_{min} . Во втором варианте учитывались все ограничения. Результаты поиска приведены в табл. 4.

Анализ приведённых результатов показывает, что при мощностях более 40 кВт по причине необходимости ограничения температуры изоляционных материалов приходится увеличивать поверхность охлаждения за счёт значительного уменьшения β (на 30...60 %). Для обеспечения минимально допустимой толщины стенок кольца вторичной обмотки одновременно необходимо на 30...75 % увеличивать число витков в первичной обмотке, что приводит к росту стоимости активных материалов на 5...15 %. Уменьшение электромагнитных нагрузок приводит к более значительному повышению стоимости и увеличению массогабаритных показателей всего трансформатора. В нагревательных элементах мощностью более 100 кВт для обеспечения требуемой температуры изоляционных материалов необходимо значительно уменьшать коэффициент β (менее 0,5), что приводит к проблемам обеспечения прочности конструкции, поэтому трансформаторы мощностью более 100 кВт не рекомендуется выполнять без до-

полнительных мер по охлаждению первичной обмотки и магнитопровода. Для этого можно трубу с поступающей водой выполнить с двумя петлями, охватывающими по длине верхнее и нижнее ярма, а первичную обмотку выполнить с аксиальными охлаждающими каналами для циркуляции воздуха по аналогии с сухими силовыми трансформаторами. Для защиты от внешних воздействий нагревательный блок должен иметь корпус с жалюзи для циркуляции воздуха.

Результаты электромагнитных расчётов выбранных вариантов с учётом ограничений (табл. 4) для серии мощностей 10...160 кВт соответствуют результатам поиска по полиномам (отличия до 5 %). Следует так же отметить, что при использовании в качестве вторичной обмотки нержавеющей немагнитных сталей, стоимость активных материалов повышается более чем на 50 % (табл. 1), что экономически не выгодно.

В работе был выполнен ряд расчётов трансформаторов мощностью 10...160 кВт. На их основе выработаны рекомендации по выбору исходных данных при проектировании НЭТ с вторичной обмоткой в виде кольца из алюминиевого сплава АМГ5М. Эти рекомендации в виде графиков представлены на рис. 6.

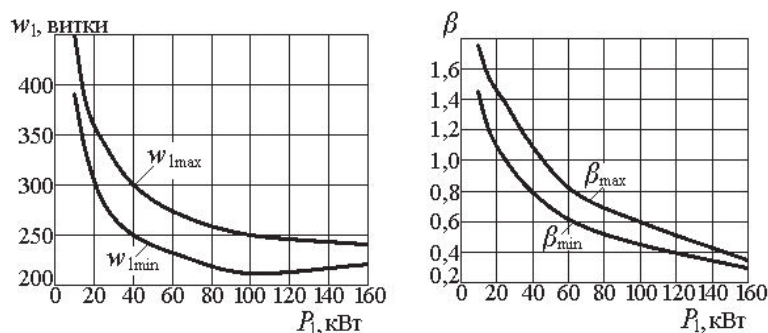


Рис. 6. Рекомендации по выбору исходных данных

Таким образом, в работе предложена конструкция трёхфазного трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой, работающего в качестве электроводонагревателя. Описаны особенности электромагнитного и теплового расчётов учитывающие конструкцию и режим работы таких устройств. Приведены результаты исследований для трансформатора мощностью 25 кВт

с вторичной обмоткой из алюминиевого сплава. Предложены рекомендации по выбору числа витков в первичной обмотке w_1 и геометрического коэффициента β для проектирования трансформаторов минимальной стоимости мощностью от 10 до 160 кВт с использованием математического аппарата метода планирования эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин В.М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 144 с.
2. Тихомиров П.М. Расчёт трансформаторов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с., ил.
3. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчёты в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
4. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с., ил.
5. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
6. Прайс-лист на обмоточные провода ООО «Кабельпласт». 2010. URL: <http://www.cabelplast.ru/obmotka> (дата обращения: 25.10.2010).
7. Прайс-лист на цветной металл компании «МПП-Групп». 2010. URL: http://www.metalport.ru/prices/id_1621_page_6 (дата обращения: 25.10.2010).
8. Прайс-лист оптовой металлоторговой компании «АВЕРС-Спецсталь». 2010. URL: <http://www.avers-steel.ru/prices/AI-SI304.pdf> (дата обращения: 25.10.2010).

Поступила 29.03.2011 г.

УДК 537.876.4

РАСЧЕТ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПО ПОТЕРЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОЙ НАГРУЗКЕ ФАЗ МЕТОДОМ ПРИВЕДЕННОЙ МОЩНОСТИ

В.Б. Вайнштейн*, В.Д. Никитин, К.П. Толкачева

*ООО «Томский нефтехим»

Томский политехнический университет

E-mail: geltir@sibmail.com; tkp@tpu.ru

Анализируются существующие и предлагаются новые усовершенствованные инженерные методы расчета потерь напряжения в электрических, в первую очередь – осветительных сетях, учитывающие степень неравномерности распределения нагрузки по фазам.

Ключевые слова:

Потеря напряжения, неравномерная нагрузка фаз, нулевой провод, электроэнергия.

Key words:

Voltage loss, uneven load of stage, neutral wire, electric power.

Введение

Расчет по потере напряжения (ПН) является определяющим (критическим) для протяженных сетей [1]; как базовый рассматривается случай равномерной нагрузки фаз (РНФ). Однако даже если при проектировании сеть была нагружена равномерно, и монтаж выполнен правильно, то при эксплуатации и в ходе реконструкций РНФ часто нарушается. Несимметрия напряжения может носить систематический (постоянная перегрузка одной из фаз) или вероятностный характер (непостоянство нагрузок в зависимости от случайных факторов). Для жилых зданий характерна неустраняемая асимметрия нагрузок; ток в нулевом проводе домов с электроплитами и в сетях с разрядными лампами

нередко составляет 40...50 % тока в фазном проводе. Обычно расчетчик, с целью упрощения, неравномерностью пренебрегает, а в крайнем случае прибегает к формуле Цейтлина [2]. Как положительный пример – отметим решение [3. С. 170].

Любопытно различие в подходах к не-РНФ: у электроснабженцев – «увеличение потерь мощности и энергии»; у светотехников – «существенное изменение светового потока, срока службы источников света (ИС) и других параметров».

В работе поставлена задача: проанализировать литературу по расчету сетей с несимметрией напряжения и оценив возможности для совершенствования расчетов ПН, создать методику, позволяющую ускорить расчеты в сетях с не-РНФ.