

Сериков А. В., Костюченко В. И.
A. V. Serikov, V. I. Kostyuchenko

**РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ РАСЧЁТА ТРЁХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ
ДЛЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОВОДОНАГРЕВА**

**RECOMMENDATIONS CONCERNING CALCULATION OF THREE-PHASE
TRANSFORMERS WITH A SPATIAL MAGNETIC SYSTEM FOR ELECTRIC
WATER HEATING PLANTS**



Сериков Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-909-899-05-98. E-mail: kem@knastu.ru.

Mr. Aleksandr V. Serikov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27 Lenina pr.; + (7909) 899-05-98. E-mail: kem@knastu.ru.



Костюченко Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент военной кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-914-173-63-08. E-mail: kem@knastu.ru.

Mr. Vladimir I. Kostyuchenko – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Military Education, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27 Lenina pr.; + (7914) 173-63-08. E-mail: kem@knastu.ru.

Аннотация. Представлена конструкция трёхфазного трансформатора с пространственной магнитной системой и короткозамкнутой обмоткой цилиндрического типа. Описаны особенности проектирования данного устройства. Приведены результаты расчёта трансформатора мощностью 25 кВт. Даны рекомендации для расчёта трансформатора минимальной стоимости с использованием метода планирования эксперимента.

Summary. The paper proposes a design of a three-phase transformer with a spatial magnetic system and a short-circuit cylindrical type winding. The peculiarities of designing such devices are described. Calculation results for a 25 kW transformer are given. Recommendations for calculating a minimum price transformer using the method of experimental design are given.

Ключевые слова: нагревательный элемент трансформаторного типа, электромагнитный расчёт, тепловой расчёт, планирование эксперимента.

Key words: transformer-type heating element, electromagnetic calculation, thermal calculation, method of experimental design.

УДК 621.314.21

Проблема горячего водоснабжения и отопления потребителей, удалённых от централизованных систем теплоснабжения, является в настоящее время актуальной. Использование децентрализованных систем позволяет экономить потребление энергоресурсов и осуществлять индивидуальное терморегулирование. Замена традиционных источников тепловой энергии электронагревательными установками облегчает контроль и регулирование температу-

ры, повышает надёжность оборудования. В качестве нагревательных элементов в приборах электронагрева широко применяются трубчатые нагревательные элементы, которые имеют существенные недостатки: низкий класс электробезопасности, небольшой срок службы и невысокую надёжность.

Качественно улучшить условия получения горячей воды могут нагревательные элементы трансформаторного типа (НЭТ), состоящие из магнитопровода, первичной и вторичной обмоток, причём вторичная обмотка выполняется в виде короткозамкнутого (КЗ) витка, в котором выделяется основная доля тепла [3]. Короткозамкнутая обмотка непосредственно, без дополнительного слоя изоляции и промежуточного теплообменника контактирует с нагреваемой водой. Такое техническое решение позволяет получить более безопасный в эксплуатации и надёжный нагревательный элемент с большим сроком службы. При выборе конструктивной схемы немаловажным фактором является возможность изготовления устройства на существующих предприятиях трансформаторостроения без значительных капиталовложений. В связи с этим возникает необходимость разработки и исследования данных конструкций.

Безопасность НЭТ обеспечивается многоуровневой электрической изоляцией первичной обмотки, отсутствием электрической связи между вторичной обмоткой и сетью. Кроме этого, на этапе проектирования напряжение витка выбирается так, чтобы на КЗ обмотке электрический потенциал был менее допустимого по условиям безопасной эксплуатации.

Конструкцией, удовлетворяющей этому условию, является трёхфазный трансформатор с пространственной магнитной системой призматической формы 1 (рис. 1). На стержнях магнитопровода размещена многослойная первичная обмотка 2. Вторичная обмотка состоит из трёх цилиндров 3, концентрически охватывающих первичные обмотки, боковины 4, охватывающей все три стержня с обмотками, и двух торцевых дисков 6 (верхнего и нижнего). Конструкция вторичной обмотки образует герметичную полую камеру 5, в которой циркулирует нагреваемая вода. В камере имеются патрубки для входа и выхода нагреваемой жидкости. Рассматриваемый нагревательный элемент работает в проточном режиме, причём для повышения коэффициента полезного действия (КПД) вторичная обмотка должна иметь хорошую тепловую изоляцию [3].

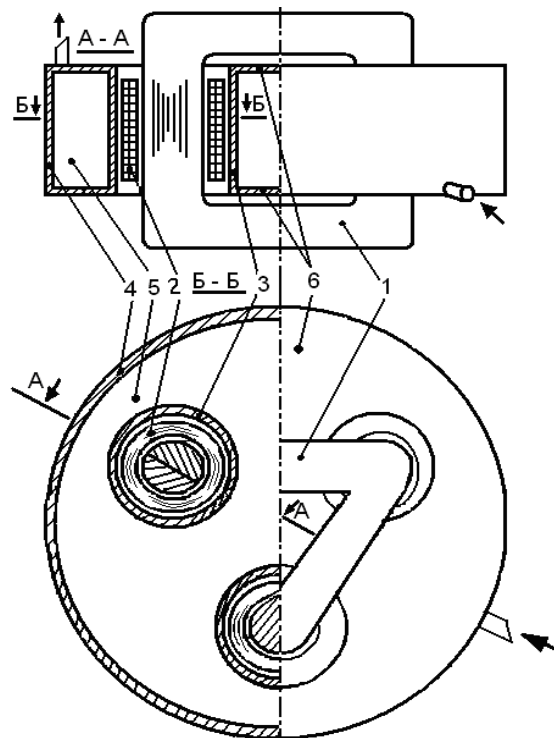


Рис. 1. Трёхфазный НЭТ с пространственной магнитной системой призматической формы

Так как существующие рекомендации для проектирования силовых трансформаторов [5] не учитывают особенности конструкции и режима эксплуатации НЭТ, то целью работы является создание методики проектирования и получение рекомендаций по выбору исходных данных для расчёта такого устройства.

За основу принята методика расчёта трёхфазного силового двухобмоточного сухого трансформатора [5]. Расчёт включает в себя:

- выбор 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.

Исходными данными к электромагнитному расчёту являются мощность трансформатора, число фаз, напряжение и частота питающей сети. По рекомендациям выбираются материалы первичной и вторичной обмоток, число витков первичной обмотки, геометрический коэффициент β , электромагнитные нагрузки (плотность тока в первичной обмотке и индукции в стержне и ярме магнитопровода), а также изоляционные расстояния главной изоляции обмоток.

При определении основных электрических величин и размеров трансформатора вычисляются по известным формулам [5] ток первичной обмотки, электродвижущая сила (ЭДС) витка, активное сечение и диаметр стержня, а также – предварительно – высота первичной обмотки.

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

$$E_{\text{в}} = \frac{U_{1\text{ф}} - I_{1\text{ф}} r_1}{w_1},$$

где $E_{\text{в}}$ – ЭДС витка, В; $U_{1\text{ф}}$ – фазное напряжение, В; $I_{1\text{ф}}$ – фазный ток, А; r_1 – активное сопротивление, Ом; w_1 – число витков в первичной обмотке.

Основной особенностью проектирования НЭТ является расчёт вторичного короткозамкнутого контура, который обеспечивает необходимые тепловые потери. Исходными данными является мощность тепловыделений во вторичной обмотке P_2 . Радиальные и осевые геометрические размеры должны быть привязаны к соответствующим размерам первичной обмотки. Толщина цилиндра δ подбирается таким образом, чтобы обмотка имела необходимое активное сопротивление и, следовательно, обеспечивала заданную мощность тепловыделений, определяемую по формуле

$$P_2 = m E_{\text{в}}^2 \left(\frac{1}{R_{2\text{ц}}} + \frac{2}{R_{2\text{т}}} \right),$$

где P_2 – мощность тепловыделений, Вт; m – число фаз; $R_{2\text{ц}}$, $R_{2\text{т}}$ – активные сопротивления цилиндра и торцевой части вторичной обмотки, Ом.

По геометрическим размерам определяется масса вторичной обмотки. Алгоритм расчёта вторичной обмотки представлен на рис. 2.

Методики окончательного расчёта магнитной системы и определения параметров холостого хода ничем не отличаются от соответствующих методик расчёта силового трансформатора с пространственной магнитной системой [5].

Важным этапом при расчёте трансформатора для установок электроводонагрева является оценка его теплового состояния. Для этого была составлена тепловая схема замещения для среднего по высоте сечения стержня (рис. 3). Расчёт проводился для наиболее нагруженного режима работы, когда все потери идут на нагрев воды в баке (теплоизолированный

корпус). Тепловые сопротивления и коэффициент конвективной теплоотдачи определялись по известным методикам и формулам [4].

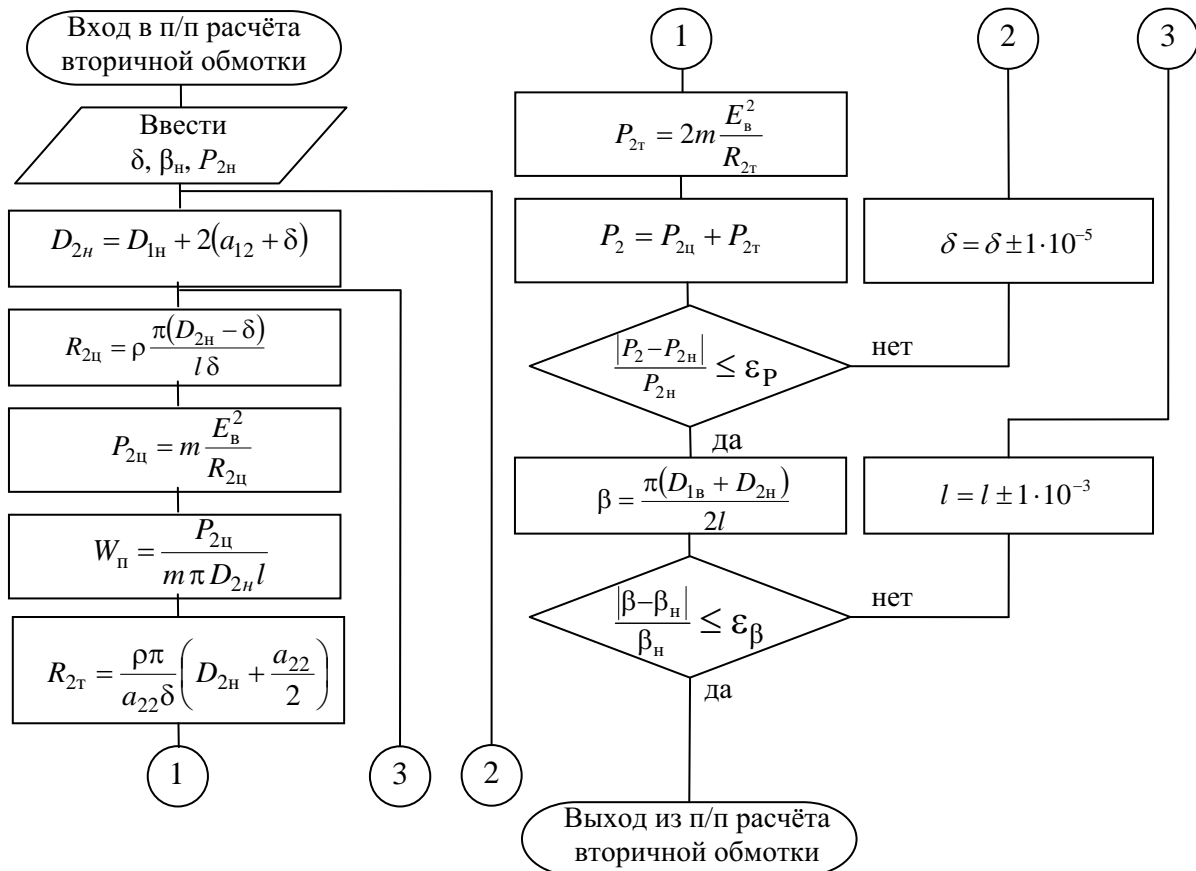


Рис. 2. Алгоритм расчёта вторичной обмотки:

$P_{2н}$, β_n – необходимые значения мощности тепловыделений во вторичной обмотке и геометрического коэффициента β ; $D_{1в}$, $D_{1н}$, $D_{2н}$ – внутренние и наружные диаметры первичной и цилиндра вторичной обмоток, м; a_{12} , a_{22} – изоляционные расстояния между первичной обмоткой и цилиндром, а также между двумя цилиндрами соседних фаз, м; δ – толщина листа вторичной обмотки, м; ρ – удельное электрическое сопротивление материала вторичной обмотки, Ом·м; l – высота цилиндра вторичной обмотки, м; $P_{2ц}$, $P_{2т}$ – мощности тепловыделений в цилиндрической и торцевой частях вторичной обмотки, Вт; $W_п$ – удельная мощность с поверхности цилиндра, Вт/м²; P_2 – мощность тепловыделений во вторичной обмотке, Вт; ϵ_p , ϵ_β – точности при расчёте мощности тепловыделений во вторичной обмотке и при расчёте β соответственно

Экономический расчёт НЭТ включает в себя определение масс и ориентировочную стоимость активных материалов. Особенностью является то, что для сравнения различных вариантов расчёта удобно выразить стоимость активных материалов трансформатора в условных единицах (у. е.) 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. Для получения стоимости активных материалов в рублёвом эквиваленте достаточно результат умножить на цену стали. Таким образом, стоимость активных материалов $C_{акт}$, у. е., 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 – соответственно массы электротехнической стали, обмоточного провода и материала вторичной обмотки, кг.

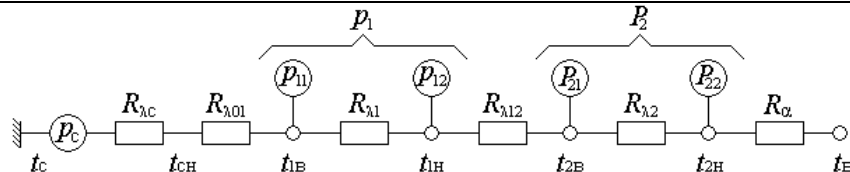


Рис. 3. Тепловая схема замещения:

p_c, p_1 – потери в магнитопроводе и первичной обмотке, Вт; $R_{\lambda c}, R_{\lambda 01}, R_{\lambda 1}, R_{\lambda 12}, R_{\lambda 2}$ – тепловые сопротивления теплопроводности стержня магнитопровода, между стержнем и первичной обмоткой, первичной обмотки, между первичной и вторичной обмотками и вторичной обмотки соответственно, °С/Вт; R_{α} – тепловое сопротивление теплоотдачи с поверхности вторичной обмотки, °С/Вт; $t_c, t_{сн}$ – температуры внутри и на поверхности стержня магнитопровода, °С; $t_{1в}, t_{1н}$ – температуры внутренней и наружной частей первичной обмотки, °С; $t_{2в}, t_{2н}$ – температуры на внутренней и наружной поверхностях цилиндра, °С; $t_в$ – температура воды, °С

По приведённой методике выполнены электромагнитные расчёты серии нагревательных элементов мощностью 10...100 кВт. Результаты расчёта трансформатора мощностью 25 кВт с короткозамкнутой вторичной обмоткой, выполненной из алюминиевого сплава марки АМГ5М, и первичной обмоткой из алюминиевого прямоугольного провода марки АПСДК приведены в табл. 1. Схема соединения первичной обмотки – звезда. Величина фазного напряжения 220 В.

Таблица 1

Результаты электромагнитного расчёта

Величина, единица измерения	Обозначение	Результат
Фазный ток первичной обмотки, А	$I_{1ф}$	38,7
Диаметр стержня, м	d	0,063
Высота первичной обмотки, м	l	0,289
Внутренний диаметр первичной обмотки, м	$D_{1в}$	0,067
Наружный диаметр первичной обмотки, м	$D_{1н}$	0,131
Полные потери в первичной обмотке, Вт	p_1	551,4
ЭДС витка, В	$E_в$	0,902
Число витков	w_1	239
Мощность тепловыделений во вторичной обмотке, кВт	P_2	24,440
Толщина стенки цилиндров, торцевых частей и бака, мм	δ	1,11
Внутренний диаметр цилиндра, м	$D_{2в}$	0,135
Наружный диаметр цилиндра, м	$D_{2н}$	0,137
Удельная поверхностная мощность цилиндров, Вт/см ²	$W_{п}$	6,11
Геометрический коэффициент	β	1,11
Длина стержня, м	l_c	0,319
Расстояние между осями стержней, м	C	0,148
Потери холостого хода, Вт	P_x	66,1
Наружный диаметр трансформатора, м	D_n	0,32
Масса первичной обмотки, кг	G_1	16,77
Масса бака, кг	G_2	2,23
Масса электротехнической стали, кг	$G_{ст}$	36,61
Стоимость активных материалов, у.е.	$C_{акт}$	63,14

Тепловое состояние НЭТ оценивалось для наиболее нагруженного режима при средней температуре нагреваемой воды 77,5 °С и её расходе 23,8 л/мин. При этом температура воды на входе в нагревательный элемент задавалась 70 °С (максимально допустимая в обратном трубопроводе при использовании в автономной системе теплоснабжения), а на выхо-

де составляла 85 °С. Коэффициенты теплопроводности материалов выбраны по [2] и имеют значения, приведённые в табл. 2.

При температуре теплоотдающей поверхности более 100 °С возникает кипение. В этом случае коэффициент теплоотдачи определялся по формуле

$$\alpha = \frac{44(t_{2H} - 100)^3}{t_{2H} - t_B} + \alpha_K,$$

где α – коэффициент теплоотдачи с учётом кипения, Вт/(м²·°С); t_{2H} – температура теплоотдающей стенки, °С; t_B – среднемассовая температура воды, °С; α_K – коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции без учёта кипения, определяемый по [2; 4], Вт/(м²·°С).

Таблица 2

Коэффициенты теплопроводности элементов конструкции трансформатора

Элемент конструкции	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Стержень магнитопровода	4,00
Первичная обмотка поперёк намотки провода	1,75
Изоляция катушки	0,18
Вторичная обмотка	100,00

Результаты теплового расчёта по схеме замещения для трансформатора мощностью 25 кВт (рис. 4) показывают, что для таких устройств необходимо использовать изоляционные материалы класса нагревостойкости *H*.

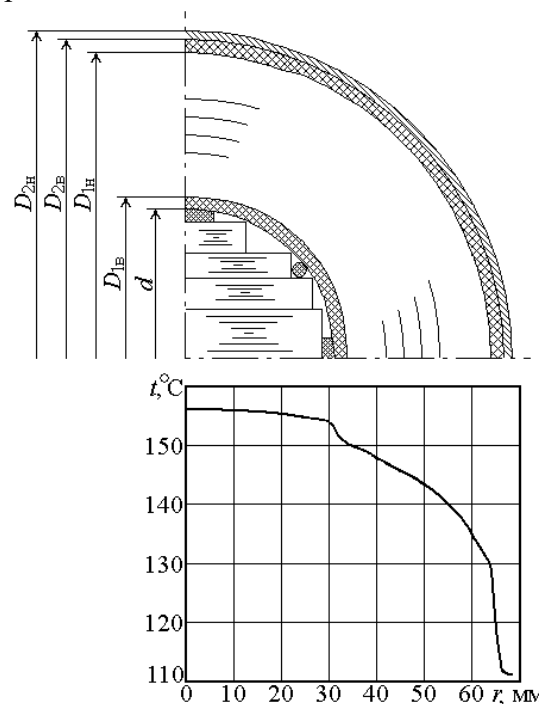


Рис. 4. Распределение температуры в среднем сечении

С целью получения рекомендаций для проектирования НЭТ в работе исследовано влияние числа витков в первичной обмотке w_1 и геометрического коэффициента β на массы активных материалов (провод первичной обмотки G_1 , магнитопровод $G_{ст}$ и материал бака G_2), на их стоимость $C_{акт}$, толщину листа вторичного контура δ , максимальную температуру изоляции $t_{из}$ и плотность теплового потока с поверхности цилиндра вторичной обмотки в воду $W_{п}$. Коэффициент β так же, как и в традиционных силовых трансформаторах, устанавливает соотношение между диаметром и высотой обмотки и для исследуемого устройства определяется по формуле

Сериков А. В., Костюченко В. И.

РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ РАСЧЁТА ТРЁХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОВОДОНАГРЕВА

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

где d_{12} – средний диаметр первичной обмотки и цилиндра вторичной обмотки, м.

Математические модели, которые связывают все перечисленные параметры, найдены с помощью метода планирования эксперимента на основе ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) второго порядка, что позволяет получить достаточно точные аппроксимирующие выражения в виде полиномов второй степени [1]. Электромагнитные нагрузки выбирались с учётом существующих рекомендаций для классических силовых трансформаторов. 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 β определяется размерами первичной обмотки, которые зависят от распределения витков по слоям. Число витков в слое также не может быть дробным. С целью определения интервалов варьирования для числа витков и геометрического коэффициента β проведена серия предварительных расчётов. В каждом расчёте плотность тока в первичной обмотке выбиралась так, чтобы максимальная температура первичной обмотки не превышала 165 °С и соответствовала классу нагревостойкости изоляции H . Также накладывались ограничения по выбору числа витков, чтобы ЭДС витка не превысила безопасного значения 2 В. Другие ограничения при расчёте не ставились, так как распространять требование обеспечения заданных значений напряжения короткого замыкания и тока холостого хода на трансформаторы данного класса нецелесообразно.

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

Таблица 3

Уровни варьирования факторов

Переменные факторы	Уровни варьирования				
	– α	– 1	0	+ 1	+ α
Число витков в первичной обмотке w_1	200	200	250	300	300
Геометрический коэффициент β	0,7	0,7	1,0	1,3	1,3

Примечание. $\alpha = 1$ – «звёздная точка» для двухфакторного ОЦКП второго порядка

По результатам расчётного эксперимента 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 $W_{п}$, масс провода первичной обмотки G_1 , магнитопровода $G_{ст}$, бака G_2 и получены следующие выражения в кодированной системе единиц:

$$\begin{aligned} C_{акт} &= 61,854 - 0,023w_1 - 0,785\beta + 2,955w_1\beta + 2,483w_1^2 + 1,848\beta^2; \\ \delta &= 1,076 + 0,523w_1 + 0,378\beta + 0,19w_1\beta + 0,097w_1^2 + 0,032\beta^2; \\ t_{из} &= 153,1 + 7,25w_1 + 13,233\beta + 3,075w_1\beta + 1,05w_1^2 + 1,0\beta^2; \\ W_{п} &= 5,989 - 0,277w_1 + 0,777\beta - 0,245w_1\beta - 0,083w_1^2 - 0,183\beta^2; \\ G_1 &= 16,739 + 3,386w_1 + 1,125\beta + 0,575w_1\beta + 0,28w_1^2 + 0,12\beta^2; \\ G_{ст} &= 35,492 - 6,616w_1 - 3,202\beta + 1,533w_1\beta + 1,611w_1^2 + 1,542\beta^2; \\ G_2 &= 2,161 + 1,198w_1 + 0,535\beta + 0,386w_1\beta + 0,295w_1^2 + 0,086\beta^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Поверхность отклика в факторном пространстве для зависимости $C_{\text{акт}} = f(w_1, \beta)$ имеет точку экстремума (минимума) $C_{\text{акт. min}}$ с координатами $w_{1\text{min}} = -0,23$ и $\beta_{\text{min}} = 0,4$ в кодированной системе единиц (рис. 5). Им соответствуют истинные значения факторов $w_{1\text{min}} = 239$ витков и $\beta_{\text{min}} = 1,11$.

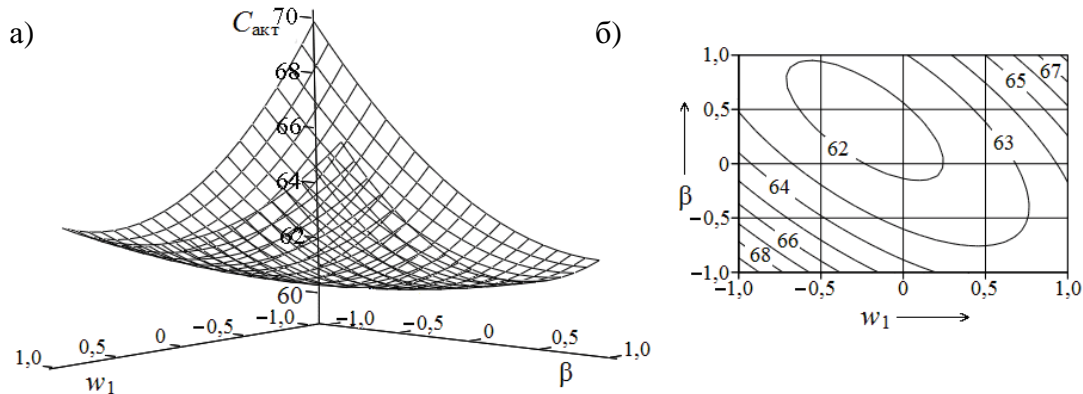


Рис. 5. Поверхность отклика (а) и контурный график (б) для НЭТ мощностью 25 кВт

При выборе наилучшего варианта проектирования учитывались следующие обстоятельства: во-первых, для обеспечения повышенной электробезопасности максимальное напряжение прикосновения к вторичной обмотке должно быть меньше допустимого по условиям эксплуатации. При расчёте принималось максимально возможное напряжение витка 2 В. Во-вторых, с целью замедления процесса образования накипи плотность теплового потока с теплоотдающей поверхности (наружной поверхности цилиндров) ограничивается величиной 10 Вт/см^2 . Это обстоятельство учитывалось при расчёте размеров цилиндров. В-третьих, температура изоляционных материалов не должна превышать допустимого значения для выбранного класса нагревостойкости H . В-четвёртых, толщина вторичной обмотки не может быть менее 1 мм для обеспечения достаточной прочности бака и возможности использования сварки при сборке вторичной обмотки. Важным является то, что все тепловые потери трансформатора при работе в качестве нагревательного элемента идут на нагрев воды и электромагнитный КПД может быть меньше, чем у классических трансформаторов, поэтому допустимо завышение электромагнитных нагрузок.

С целью получения рекомендаций по выбору исходных данных при расчёте трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой по полиномам (1) были построены зависимости $C_{\text{акт}} = f(w_1)$, $\delta = f(w_1)$, $t_{\text{из}} = f(w_1)$ и $W_{\text{п}} = f(w_1)$ при условии $\beta = \beta_{\text{min}}$ (рис. 6, а) и $C_{\text{акт}} = f(\beta)$, $\delta = f(\beta)$, $t_{\text{из}} = f(\beta)$ и $W_{\text{п}} = f(\beta)$ при $w_1 = w_{1\text{min}}$ (рис. 6, б). Анализ полученных графиков показывает, что функции для стоимости активных материалов имеют минимумы, которые определяют рекомендации по выбору числа витков первичной обмотки w_1 и геометрического коэффициента β . Ограничивающими условиями являются: температура изоляционных материалов $t_{\text{из}}$, толщина вторичной обмотки δ и плотность теплового потока $W_{\text{п}}$. Таким образом, из рис. 6 видно, что для трансформатора мощностью 25 кВт число витков в первичной обмотке рекомендуется выбирать в пределах 230...263, а геометрический коэффициент β – в пределах 1,04...1,29. Причём для удовлетворения всех ограничений при больших значениях β необходимо выбирать меньшие значения w_1 . В этом случае стоимость активных материалов не превышает минимальную стоимость более чем на 5 %, температура изоляционных материалов соответствует классу нагревостойкости H и толщина материала бака более 1 мм. Из графиков (см. рис. 6) видно, что в исследуемом интервале изменения w_1 и β условие по ограничению плотности теплового потока $W_{\text{п}}$ выполняется.

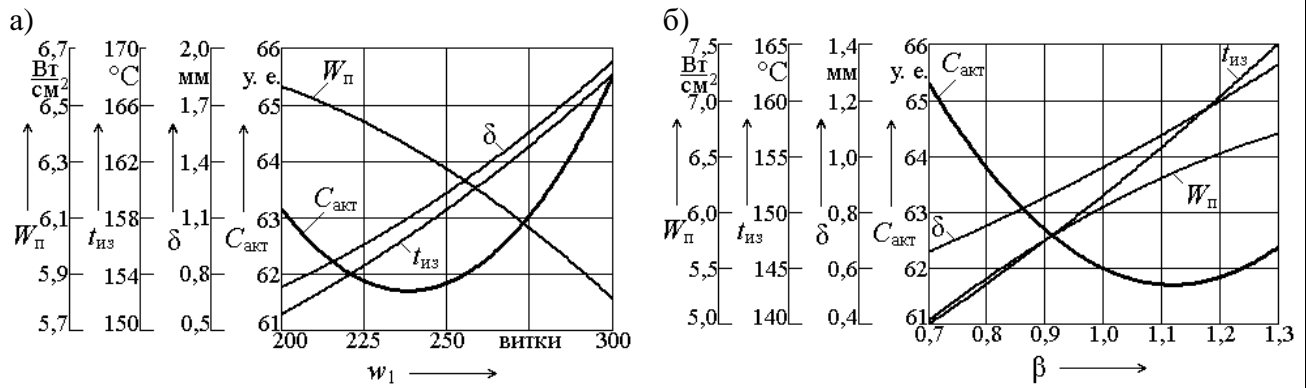


Рис. 6. Результаты исследований для НЭТ мощностью 25 кВт

Уравнения

$$G_1 = f(w_1, \beta), \quad G_{ст} = f(w_1, \beta) \quad \text{и} \quad G_2 = f(w_1, \beta)$$

позволяют получить универсальное выражение стоимости активных материалов для других цен по формуле

$$C_{акт}(w_1, \beta) = G_{ст}(w_1, \beta) + k_{1с}G_1(w_1, \beta) + k_{2с}G_2(w_1, \beta).$$

Полученная модель также может быть исследована для выявления варианта проектирования трансформатора с минимальной стоимостью активных частей.

С целью получения рекомендаций по выбору исходных данных при расчётах трансформаторов других мощностей по аналогичной методике исследовано влияние w_1 и β на массогабаритные и стоимостные показатели. На рис. 7 представлены результаты поиска варианта, соответствующего минимальной стоимости активных материалов $C_{акт}$ для трансформаторов мощностью $P_1 = 10 \dots 100$ кВт. Анализ результатов исследований показывает, что при мощностях более 40 кВт температура изоляционных материалов $t_{из}$ и плотность теплового потока с поверхности вторичной обмотки в воду $W_п$ могут превышать допустимые значения. Наиболее эффективным способом снижения $t_{из}$ и $W_п$ является уменьшение геометрического коэффициента β . В этом случае стоимость $C_{акт}$ увеличивается незначительно (менее 5%). Уменьшение электромагнитных нагрузок приводит к более значительному повышению стоимости и увеличению массогабаритных показателей всего трансформатора. В нагревательных элементах мощностью 100 кВт и более для обеспечения требуемых ограничений необходимо значительно уменьшать коэффициент β (до значений менее 0,6), что приводит к проблемам обеспечения прочности конструкции, поэтому трансформаторы мощностью 100 кВт и более не рекомендуется выполнять по такой конструктивной схеме. Следует отметить, что при использовании в качестве вторичной обмотки нержавеющей немагнитных сталей, стоимость активных материалов повышается на 15...20 %, что экономически менее выгодно.

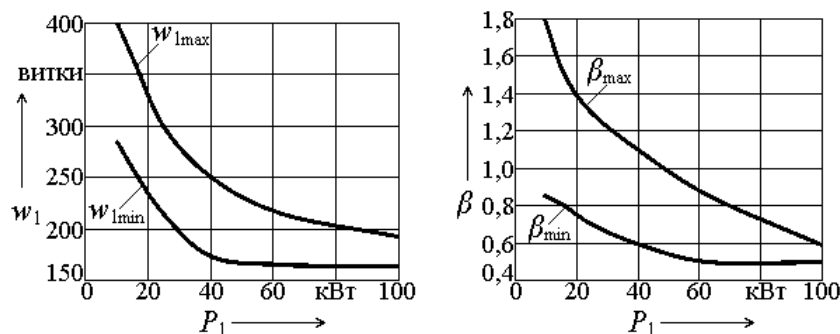


Рис. 7. Рекомендации по выбору исходных данных



Таким образом, в работе предложена конструкция трёхфазного трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой, работающего в качестве электропроводонагревателя; описаны разработанные методики электромагнитного и теплового расчётов с учётом особенностей конструкции, режима работы и эксплуатации таких устройств; приведены результаты исследований трансформатора мощностью 25 кВт с вторичной обмоткой, выполненной из алюминиевого сплава; предложены рекомендации для расчёта НЭТ мощностью 10...100 кВт минимальной стоимости с использованием математического аппарата метода планирования эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивоботенко, Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
2. Крейт, Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
3. Сериков, А. В. Электронагревательные элементы и устройства трансформаторного типа для систем теплоснабжения: моногр. / А. В. Сериков, В. М. Кузьмин. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 247 с.
4. Сипайлов, Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчёты в электрических машинах / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.
5. Тихомиров, П. М. Расчёт трансформаторов / П. М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
6. Прайс-лист на обмоточные провода ООО «Кабельпласт». URL: <http://www.cabelplast.ru/obmotka> (дата обращения 25.10.2010).
7. Прайс-лист оптовой металлоторговой компании «АВЕРС-Спецсталь». URL: <http://www.avers-steel.ru/prices> (дата обращения 25.10.2010).
8. Прайс-лист на цветной металл компании «МПП-Групп». URL: http://www.metalport.ru/prices/id_1621_page_6 (дата обращения 25.10.2010).