

УДК 621.314.2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА

А.В. Сериков, А.Н. Тимошенко

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

E-mail: kem@knastu.ru

Приведена конструкция электронагревательного устройства трансформаторного типа. Рассмотрены особенности и результаты его расчета. Предложены рекомендации для проектирования подобных устройств.

Ключевые слова:

Электронагревательное устройство трансформаторного типа, методика проектирования, планирование эксперимента, рекомендации для расчета.

Key words:

Transformer-type electric heating device, design method, planning an experiment, designing recommendations.

В сфере жизнеобеспечения человека заметно растут объемы потребления электроэнергии, которая преобразуется в тепло. Это обусловлено очевидными преимуществами процессов электронагрева по сравнению с получением тепла при прямом сжигании любых видов органического топлива. В качестве нагревательных элементов наиболее широкое распространение получили резистивные трубчатые электронагреватели и нагреватели электродного типа. Использование таких типов нагревательных элементов не способствует повышению надежности и уровня безопасности теплогенерирующих устройств. Безопасность эксплуатации электронагревательных устройств наиболее актуальна при их использовании в бытовой сфере жизнеобеспечения человека, особенно при нагреве электропроводных сред, например, воды. Поэтому рекомендуется использовать в качестве нагревательных приборов устройства, имеющие второй класс по электробезопасности. Такие устройства должны иметь двойную или усиленную электрическую изоляцию поверхности, контактирующей с нагреваемой средой, от электрической сети.

Указанным требованиям в полной мере отвечают нагревательные элементы трансформаторного типа (НЭТ). Их отличительной особенностью является наличие всех основных элементов конструкции трансформатора: магнитопровода, первичной и вторичной обмоток [1]. Магнитопровод и первичная обмотка должны иметь конструкцию, аналогичную конструкциям, применяющимся в силовых трансформаторах, что позволяет выпускать НЭТ на предприятиях с использованием традиционных технологических процессов. Высокий уровень безопасности НЭТ обеспечивается отсутствием электрической связи между вторичной обмоткой и сетью, многоуровневой электрической изоляцией первичной обмотки, а также выбором при расчете напряжения витка таким образом, чтобы электрический потенциал цепи на вторичной обмотке был менее допустимого по условиям безопасной эксплуатации. Одной из основных задач является выявление особенностей расчета таких устройств, а также создание рекомендаций по их проектированию, которые бы позволили решить

проблему расчета и изготовления серии НЭТ для ряда мощностей.

Одной из возможных конструкций НЭТ является трансформатор с трехфазным индуктором на основе плоской трехстержневой магнитной системы — 1 (рис. 1), широко используемый в силовых трансформаторах. Отличительной особенностью является конструкция вторичной обмотки [2], которая состоит из трех цилиндров — 3, concentric охватывающих первичную обмотку — 2. Цилиндры размещены в диэлектрическом баке — 4, по которому протекает нагреваемая жидкость. Бак состоит из боковины — 5, крышки — 6, дна — 7 и внутренних цилиндров — 8.

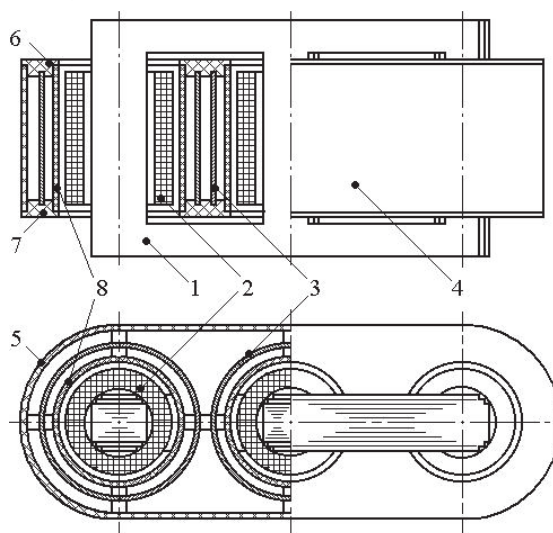


Рис. 1. НЭТ с цилиндрической вторичной обмоткой и диэлектрическим баком

При подключении НЭТ к трехфазной сети основная часть тепла выделяется в цилиндрах вторичной обмотки, которые интенсивно охлаждаются протекающей в баке водой. Нагретая таким образом вода поступает потребителю для нужд отопления и горячего водоснабжения.

При проектировании НЭТ необходимо учитывать особенности, которые обусловлены областью использования и конструкцией нагревательного элемента.

1. Для обеспечения повышенной электробезопасности максимальное напряжение прикосновения к вторичной обмотке должно быть менее допустимого, т. е. ЭДС витка не должна превышать значение 2 В.
2. Вторичная обмотка имеет один виток и конструктивно выполнена короткозамкнутой. В ней сосредоточена большая плотность тока и основная часть тепловой мощности.
3. Для значительного замедления интенсивности образования накипи размеры теплоотдающей поверхности вторичного контура НЭТ должны обеспечивать плотность теплового потока в воду меньше 10 Вт/см².
4. Наличие водяного охлаждения вторичной обмотки с естественной или искусственной конвекцией.
5. В качестве нагрузки выступает короткозамкнутая вторичная обмотка, активное сопротивление которой постоянно. Значение этого сопротивления должно обеспечивать номинальный режим работы НЭТ.

Эти особенности не позволяют в полной мере использовать существующие рекомендации для проектирования трансформаторов. Поэтому целью работы является создание методики расчета и получение рекомендаций для проектирования НЭТ минимальной стоимости.

За основу целесообразно взять методику расчета трехфазного силового двухобмоточного трансформатора [3]. Возможность изменения числа витков w_1 ограничивается допустимым значением напряжения витка. Поэтому по результатам расчета первичной многослойной цилиндрической обмотки необходимо уточнить ЭДС витка E_b :

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

где $U_{1\phi}$, $I_{1\phi}$, r_1 — фазные значения напряжения, тока и активного сопротивления первичной обмотки.

Важным при расчете НЭТ является определение размеров цилиндра вторичного короткозамкнутого контура, который обеспечивает необходимую мощность тепловыделений P_2 . Высота и внутренний диаметр цилиндра D_2 должны быть привязаны к размерам первичной обмотки. Таким образом, величина P_2 однозначно определяется толщиной цилиндра δ и находится по формуле:

$$P_2 = m \frac{E_b^2}{R_2} = m \frac{E_b^2 l_2 \delta}{\rho \pi (D_2 + \delta)},$$

где m — число фаз; R_2 , l_2 , D_2 — активное сопротивление, высота и средний диаметр вторичной обмотки; ρ — удельное электрическое сопротивление материала вторичной обмотки.

Методики окончательного расчета магнитной системы и определения параметров холостого хода ничем не отличаются от соответствующих методик расчета силовых трансформаторов.

Для экономической оценки рассчитываемого варианта определяется стоимость активных материалов $C_{ам}$ по формуле:

$$C_{ам} = G_{ст} c_{ст} + G_1 c_1 + G_2 c_2, \quad (1)$$

где $G_{ст}$, G_1 , G_2 — массы электротехнической стали, обмоточного провода и цилиндра вторичной обмотки; $c_{ст}$, c_1 , c_2 — цена трансформаторной стали, обмоточного провода и материала вторичной обмотки.

При выполнении экономических расчетов учитывались цены на медный обмоточный провод прямоугольного сечения марки ПСДК (159 р./кг) [4], алюминиевый сплав АМГ5М (187 р./кг) [5] и электротехническую сталь 3404 (108 р./кг).

Предварительные исследования показали, что величина $C_{ам}$ в значительной степени зависит от числа витков в первичной обмотке w_1 и геометрического коэффициента β , который определяется по формуле:

$$\beta = \frac{p d_{12}}{l_1} = \frac{p(D_{1в} + D_{2н})}{2l_1},$$

где d_{12} — средний диаметр первичной и вторичной обмоток; l_1 , $D_{1в}$ — высота и внутренний диаметр первичной обмотки; $D_{2н}$ — наружный диаметр вторичной обмотки.

С целью создания рекомендаций при проектировании НЭТ в работе исследовано влияние числа витков в первичной обмотке w_1 и геометрического коэффициента β на стоимость активных материалов $C_{ам}$, толщину цилиндра δ , плотность теплового потока с поверхности вторичной обмотки q_n , массы первичной обмотки G_1 , электротехнической стали $G_{ст}$ и цилиндров G_2 .

Метод планирования эксперимента на основе ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) второго порядка [6] позволяет получить достаточно точные аппроксимирующие выражения, которые связывают все перечисленные переменные. Такой подход обладает высокой эффективностью, то есть для создания полиномиальных моделей с учетом одновременного влияния нескольких переменных параметров на показатели проектируемого устройства достаточно выполнить минимальное число вычислений. При этом сложное математическое описание в виде методики расчета устройства заменяется простым выражением второго порядка с явной связью между переменными параметрами и показателями НЭТ. Кроме этого, метод планирования эксперимента позволяет выделить наиболее значимые факторы, влияющие на те или иные показатели НЭТ, и отбросить второстепенные, незначительно влияющие факторы.

Точность моделей, а также результаты расчетного эксперимента в целом зависят от выбора интервалов варьирования переменных факторов w_1 и β . Задача осложняется тем, что число витков в первичной обмотке не может быть дробным, а уточненный коэффициент β может отличаться от предварительно заданного значения. Это объясняется тем, что коэффициент β определяется в большей степени размерами первичной обмотки, которые зависят от распределения витков по слоям. Число витков в слое не может быть дробным значением.

В результате проведения серии расчетов в соответствии с двухфакторным ОЦКП второго порядка получены следующие аппроксимирующие выражения для НЭТ мощностью 16 кВт и интервалов варьирования факторов, приведенных в таблице:

$$\begin{aligned} C_{ам} &= 7,215 - 0,358w_1 - 0,383\beta + \\ &+ 0,702w_1\beta + 0,918w_1^2 + 0,435\beta^2; \\ q_n &= 8,24 - 0,218w_1 + 2,043\beta - \\ &- 0,659w_1\beta - 0,448w_1^2 - 0,561\beta^2; \\ \delta &= 1,135 + 0,916w_1 + 0,609\beta + \\ &+ 0,431w_1\beta + 0,197w_1^2 - 0,008\beta^2; \\ G_1 &= 16,069 + 5,488w_1 + 1,349\beta + \\ &+ 0,823w_1\beta + 0,268w_1^2 - 0,046\beta^2; \\ G_2 &= 0,581 + 0,518w_1 + 0,189\beta + \\ &+ 0,167w_1\beta + 0,156w_1^2 - 0,002\beta^2; \\ G_{ст} &= 23,069 - 12,381w_1 - 4,84\beta + \\ &+ 3,292w_1\beta + 5,805w_1^2 + 2,971\beta^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Таблица. Интервалы варьирования факторов

Переменные факторы	Интервалы варьирования				
	$-\alpha$	-1	0	1	α
Число витков первичной обмотки w_1	150	150	250	350	350
Геометрический коэффициент β	1	1	2	3	3

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

Уравнения $G_1=f(w_1, \beta)$, $G_2=f(w_1, \beta)$ и $G_{ст}=f(w_1, \beta)$ позволяют получить универсальные выражения стоимости активных материалов для других цен по формуле (1).

По полученным выражениям (2) в факторном пространстве построена поверхность отклика для зависимости $C_{ам}=f(w_1, \beta)$ (рис. 2), которая имеет минимум в точке с координатами $w_{1min}=0,04$ и $\beta_{min}=0,41$. Этим координатам соответствуют истинные значения факторов $w_{1min}=254$ витка и $\beta_{min}=2,4$. В этой точке значение стоимости активных материалов составляет 7129 р.

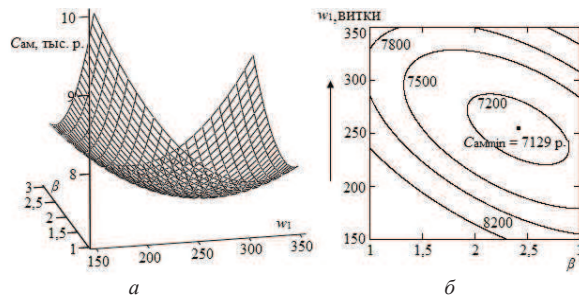


Рис. 2. Результаты исследований НЭТ мощностью 16 кВт: а) поверхность отклика; б) контурный график

При поиске варианта проектирования НЭТ минимальной стоимости необходимо учитывать следующие ограничения: толщина стенки вторичной обмотки δ должна быть более 1 мм по условиям ме-

ханической прочности и технологичности при изготовлении цилиндра; плотность теплового потока q_n не должна превышать 10 Вт/см² по условиям образования накипи.

На рис. 3 показана допустимая область поиска варианта расчета, ограниченная линиями $\delta=1$ мм, $q_n=10$ Вт/см² и $C_{ам}=1,05C_{амmin}$.

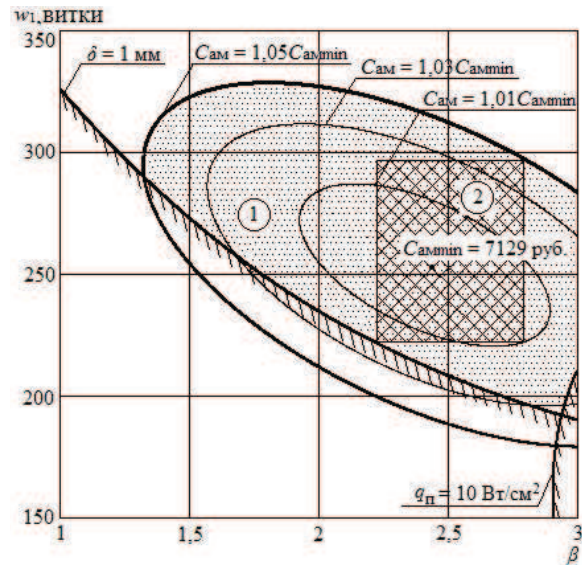


Рис. 3. Область исследования

Таким образом, точка с минимальной стоимостью $C_{амmin}$ принадлежит допустимой области. Кроме этого, приведенная область исследования позволяет выбрать интервал для w_1 и β , обеспечивающий варианты расчета, в которых стоимость активных материалов НЭТ не превышает величину $1,05C_{амmin}$, и удовлетворяются все наложенные ограничения.

Для более точного определения координат искомой области с учетом накладываемых ограничений можно использовать численные методы. В каждом конкретном случае выбору метода поиска должен предшествовать определенный анализ области факторного пространства, в котором находится решение, удовлетворяющее всем наложенным ограничениям. Полученные полиномиальные зависимости (2) достаточно просты, поэтому можно предположить, что поиск допустимых решений не встречает затруднений. В некоторых случаях область поиска резко сокращается из-за накладываемых ограничений, и получить эту область с помощью организации шаговых процедур методов направленного поиска затруднительно. Поэтому для определения области допустимых решений можно использовать наиболее простые численные методы ненаправленного поиска, например, метод прямого перебора. В результате проведенных исследований НЭТ мощностью 16 кВт рекомендуется число витков в первичной обмотке выбирать в пределах $w_1=223...297$ витков, а геометрический коэффициент $\beta=2,2...2,8$.

Таким образом, предложенная методика поиска варианта расчета НЭТ минимальной стоимости включает в себя:

1. Выявление особенностей расчета НЭТ с учетом их области использования и режима работы.
2. Выявление факторов, в большей степени влияющих на показатели НЭТ, и задание целевых функций, накладывающих ограничение на область допустимых значений.
3. Получение необходимых математических моделей на основе метода планирования эксперимента.
4. Исследование этих моделей и получение рекомендаций по проектированию с использованием графических построений или численных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сериков А.В., Кузьмин В.М. Электронагревательные элементы и устройства трансформаторного типа для систем энергообеспечения: моногр. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 247 с.
2. Электронагреватель трансформаторного типа: свид. на ПМ № 13133 Рос. Федерация. № 99117308/20; заявл. 06.08.99; опубл. 20.03.00, Бюл. № 8. – 3 с.
3. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с., ил.
4. Прайс-лист на обмоточные провода ООО «Формопласт М». 2012. URL: <http://www.formoplast-m.ru> (дата обращения: 23.03.2012).
5. Прайс-лист на цветной металл компании «Полиасмет». 2012. URL: <http://poliasmet.ru/alyumi-niy/lyuminiy-list.html> (дата обращения: 23.03.2012).
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.

Поступила 08.06.2012 г.

УДК 681.513.1

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ МИКРОГЭС БАЛЛАСТНОГО ТИПА

Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова

Томский политехнический университет
E-mail: bvl@tpu.ru

Показана возможность одновременного регулирования как активной, так и реактивной составляющей результирующей нагрузки микроГЭС с автобалластным регулированием выходного напряжения, построенной на полностью управляемых полупроводниковых вентилях. В диапазоне наиболее характерных для практики применения микроГЭС нагрузок предложено использовать балластную нагрузку активно-индуктивного характера с $\cos\phi_k=0,8$, а также установлены аналитические зависимости полиномиального типа для автоматизированного вычисления углов фазового управления вентилями балласта в зависимости от параметров полезной нагрузки станции.

Ключевые слова:

Микрогидроэлектростанция, возобновляемые энергоресурсы, система стабилизации частоты, стабилизация напряжения, эквивалентная нагрузка, балластная нагрузка, одноканальная система.

Key words:

Micro-hydro-electric power station, renewable energy sources, frequency stabilization system, voltage stabilization, equivalent load, ballast load, single channel system.

Малая гидроэнергетика по сравнению с другими традиционными видами электроэнергетики является наиболее экономичным и экологически безопасным способом получения электроэнергии. МикроГЭС (микрогидроэлектростанции) позволяют сохранять окружающую среду и природный ландшафт не только на этапе эксплуатации, но и в процессе строительства. В отличие от других экологически безопасных возобновляемых источников электроэнергии таких, как солнце, ветер, малая гидроэнергетика практически не зависит от погодных и временных условий и способна обеспечить устойчивую подачу электроэнергии потребителю.

Создание современных автоматизированных микрогидроэлектростанций (микроГЭС) требует проведения глубоких исследований, необходимость которых объясняется сложностью процессов пре-

образования потока воды в электроэнергию со стабильными параметрами. Тенденция к упрощению гидротехнической части станции существенно повышает требования к устройствам генерирования электроэнергии и стабилизации ее параметров [1].

Возмущающими воздействиями для гидроагрегата являются изменения энергии рабочего потока воды и колебания величины мощности нагрузки, уравнивающей мощность, развиваемую гидродвигателем. Если стабилизировать поток воды с помощью напорного трубопровода, то, выбирая соответствующую нагрузку источника электропитания, можно стабилизировать частоту вращения гидрогенератора, а, следовательно, и выходное напряжение.

Изменять величину нагрузки микроГЭС возможно включением на выход генератора автомати-