

УДК 621.6.058

СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Вадова Л.Ю.

*Дзержинский политехнический институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева», Дзержинск, e-mail: lvadova@mail.ru*

В предлагаемой статье проанализированы недостатки трубчатых электрических нагревателей, такие как низкий коэффициент полезного действия, который определяется малой площадью излучающей поверхности нихромовой нити или спирали, размещенной по центру трубки, а также наличием теплопроводящего слоя электроизоляции на пути теплового потока от спирали к теплоотдающей трубке, что снижает плотность и мощность теплового потока, дошедшего до металлической трубки, с внешней поверхности которой происходит теплоотдача во внешнюю среду. Другим серьезным недостатком работы трубчатого электрического нагревателя является его недолговечность, которая происходит из-за перегорания нихромовой проволоки, чему способствует высокая температура нагрева спирали и слой теплопроводящего периклаза между трубкой и спиралью, теплопроводность которого уменьшается с повышением температуры, а также газовая коррозия нихромовой проволоки, резко ускоряющаяся при высокой температуре. Для повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя необходимо увеличивать площадь теплообменной поверхности короткозамкнутого витка, контактирующей с теплоносителем (который необходимо греть), и температуру этой поверхности. В статье рассмотрены практические вопросы надежного электронагрева различных сред путем пропускания тока с одновитковой вторичной обмотки трансформатора через распределенную низкоомную нагрузку, которая, имея большую площадь поверхности теплоотдачи и высокую температуру этой поверхности, является высоконадежным, эффективным и электробезопасным нагревательным устройством. Рассмотрены вопросы расчета трансформаторного электрического нагревателя, повышения эффективности его работы, как за счет увеличения площади поверхности теплоотдачи, так и температуры этой поверхности, а также вопросы повышения надежности его работы. Надежность работы трансформаторного нагревателя не вызывает сомнений, так как ориентировочные тепловые расчеты показывают, что температура обмотки за счет теплового излучения с ее поверхности по направлению к охлаждаемой стенке кольцеобразной камеры не превысит 90–100 °С.

Ключевые слова: трансформаторный нагреватель, теплопроводность, нихромовая спираль, магнитопровод, температура

METHODS AND MEANS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE TRANSFORMER HEATER

Vadova L. Yu.

*Dzержinsk Polytechnic Institute (branch) of Nizhny Novgorod State Technical University
named after R.E. Alekseev, Dzержinsk, e-mail: lvadova@mail.ru*

In the proposed article, the disadvantages of tubular electric heaters are analyzed, such as a low efficiency, which is determined by the small area of the radiating surface of a nichrome thread or spiral located in the center of the tube, as well as the presence of a heat-conducting layer of electrical insulation on the path of the heat flow from the spiral to the heat-emitting tube, which reduces the density and power of the heat flow that has reached the metal tubes, from the outer surface of which heat is transferred to the external environment. Another serious disadvantage of the tubular electric heater is its fragility, which occurs due to the burning out of the nichrome wire, which is facilitated by the high heating temperature of the spiral and a layer of heat-conducting periclase between the tube and the spiral, the thermal conductivity of which decreases with increasing temperature, as well as gas corrosion of the nichrome wire, which accelerates sharply at high temperature. To increase the efficiency of the transformer heater, it is necessary to increase the area of the heat exchange surface of the closed loop in contact with the coolant (which needs to be heated) and the temperature of this surface. Practical issues of reliable electric heating of various media by passing current from the single-turn secondary winding of the transformer through a distributed low-resistance load, which, having a large heat transfer surface area and a high temperature of this surface, is a highly reliable, efficient and electrically safe heating device, are considered. The issues of calculating a transformer electric heater, increasing the efficiency of its operation, both by increasing the surface area of heat transfer and the temperature of this surface, as well as issues of increasing the reliability of its operation are considered. The reliability of the transformer heater is not in doubt, since approximate thermal calculations show that the temperature of the winding due to thermal radiation from its surface towards the cooled wall of the annular chamber will not exceed 90–100 °C.

Keywords: transformer heater, thermal conductivity, nichrome spiral, magnetic circuit, temperature

Во всех областях деятельности человека, связанной с теплообменом, используется такой вид теплоносителя, как электронагрев. Нагревание электрическим током обеспечивает равномерный и быстрый нагрев, а также легкое регулирование

степени нагрева. Преобразование электрической энергии в тепловую производится путем нагрева электрическим током или самого нагреваемого тела, или специальных нагревательных элементов, например всевозможных нитей или спиралей

из высокоомной проволоки, которые разогреваются до высокой температуры и передают тепло нагреваемому телу. Наиболее распространен среди нагревательных элементов трубчатый электрический нагреватель (ТЭН). ТЭН изобретен и запатентован в 1859 г. американским инженером Джорджем Б. Симпсоном. С тех пор сам ТЭН по существу изменился мало. Он остается одним из основных преобразователей электрической энергии в тепловую.

Трубчатый электрический нагреватель – это электронагревательный прибор в виде металлической трубки, заполненной теплопроводящим электроизолятором (периклаз).

В настоящее время ТЭНы выпускаются различной конфигурации и на различные мощности. Основной их недостаток – это низкие КПД (коэффициент полезного действия) и надежность работы.

Низкий КПД определяется малой площадью излучающей поверхности нихромовой нити или спирали, размещенных по центру трубки, а также наличием теплопроводящего слоя электроизоляции на пути теплового потока от спирали к теплоотдающей трубке, что снижает плотность и мощность теплового потока, дошедшего до металлической трубки, с внешней поверхности которой происходит теплоотдача во внешнюю среду.

Наработка на отказ ТЭНа составляет от одного месяца до одного года. Выход ТЭНа из строя происходит из-за перегорания нихромовой проволоки, чему способствуют:

- высокая температура нагрева спирали из-за стремления снять с нее большую мощность теплового потока и большой концентрации тепла внутри спирали, которое при отсутствии конвекции остается внутри спирали (съем тепла происходит только через теплопроводность периклаза;
- слой теплопроводящего периклаза между трубкой и спиралью, теплопроводность которого уменьшается с повышением температуры;
- газовая коррозия нихромовой проволоки, резко ускоряющаяся при высокой температуре;
- разнотолщинность нихромовой проволоки;
- неравномерность намотки и расположения витков нихромовой спирали в трубке;
- неизбежно присутствующие в нихромовой проволоке микродефекты (микротрещины, микропоры, раковинки и др.);
- неравномерное при высокой температуре коррозионное окисление по глубине нихромовой проволоки, приводящее к неоднородности электросопротивления и локальным перегревам;

– коррозионные нарушения целостности трубчатой оболочки;

– чрезмерные усилия на контактные стержни при подключении проводов;

– образование слоя окалины на внутренней стенке и слоя накипи на наружной поверхности стенки трубчатой оболочки, что снижает теплопередачу через нее и теплоотдачу с ее поверхности во внешнюю среду;

– нарушение герметизации выводных контактных стержней и гермовводов.

Материалы и методы исследования

Во всех способах распространения тепла в формулах теплового потока обязательно присутствуют поверхность теплообмена и разность температур теплоносителей [1].

Величина теплового потока определяется только этими двумя составляющими. Применительно к трансформаторному нагревателю это значит, что для повышения эффективности его работы необходимо увеличивать площадь теплообменной поверхности короткозамкнутого витка, контактирующей с теплоносителем (который необходимо греть), и температуру этой поверхности. Ниже представлены способы и средства повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя за счет увеличения площади поверхности теплоотдачи и температуры поверхности теплоотдачи. Но это достигается не просто увеличением геометрических размеров кольцеобразной камеры и снижением при этом температуры ее стенок, а, наоборот, одновременно увеличением поверхности теплоотдачи и температуры этой поверхности. Это стало возможно при условии помещения провода первичной обмотки в теплостойкую изоляцию, так как любое повышение мощности нагрева связано с повышением потребляемого тока от источника питания и дополнительным нагревом первичной обмотки. А максимальная теплостойкость даже стеклотканевой изоляции не превышает 240 °С.

Рассмотрим способ повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя за счет повышения площади теплоизлучающей поверхности короткозамкнутого витка.

Количество теплоты, переданное от стенок кольцеобразной камеры окружающей среде, определяется законом теплоотдачи [2]:

$$Q = \alpha \cdot S (t_{\text{ст}} - t_1) \cdot \tau,$$

где α – коэффициент теплоотдачи, является сложной функцией многих переменных;

S – площадь теплообменной поверхности;

$t_{ст}$ – температура поверхности стенки кольцеобразной камеры, обращенной к нагреваемой среде;

t_1 – температура среды, соприкасающейся с поверхностью стенки камеры;

τ – время.

На рис. 1 представлено электронагревательное устройство, первая кольцеобразная камера 3 которого помещена внутри второй перфорированной кольцеобразной камеры 6, так что теплосъем происходит не только с наружной поверхности первой камеры 3, но также с внешней и внутренней поверхностей второй камеры 6. Суммарная поверхность теплоотдачи камер 3 и 6 увеличивается многократно [3].

На рис. 2 представлен вариант выполнения трансформаторного нагревателя на двух магнитопроводах, последовательно включенных первичными обмотками, которые помещены в свои короткозамкнутые кольцеобразные камеры 5 и 6. Суммарная поверхность теплоотдачи увеличится многократно, если каждую из камер поместить в свои дополнительные перфорированные камеры.

Рассмотрим теперь способ повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя за счет повышения температуры теплоизлучающей поверхности короткозамкнутого витка.

Во всех способах передачи тепла через теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение одним из основных факторов повышения величины теплового потока является разность температур между теплоносителями. Для трансформаторного нагревателя это разность между температурой стенки и температурой среды, кон-

тактирующей с этой стенкой [4]. Любое повышение температуры стенки короткозамкнутого витка сопряжено с увеличением тока через первичную обмотку и с увеличением ее температуры. Увеличение же температуры обмотки ограничивалось изоляцией провода.

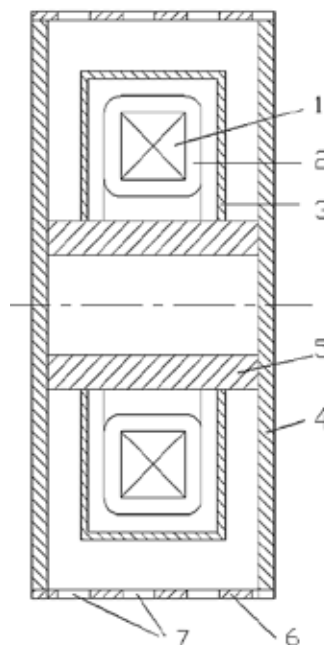


Рис. 1. Электронагревательное устройство
1 – замкнутый магнитопровод,
2 – индукционная первичная обмотка,
3 – вторичная обмотка в виде кольцеобразной замкнутой камеры, 4 – вторая кольцеобразная камера, 5 – внутренние цилиндрические части, 6 – внешняя цилиндрическая часть, 7 – перфорация

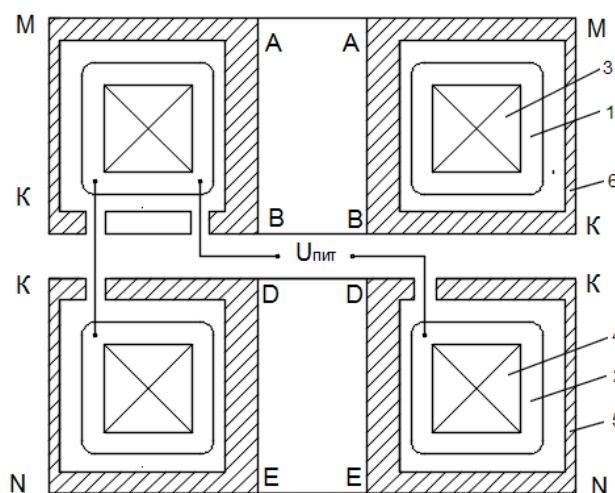


Рис. 2. Трансформаторный нагреватель на двух магнитопроводах
1, 2 – индукционная первичная обмотка, 3, 4 – замкнутый магнитопровод,
5, 6 – короткозамкнутые кольцеобразные камеры

С помещением провода первичной обмотки в теплостойкую изоляцию исчезает вероятность появления короткозамкнутых витков в самой первичной обмотке из-за ее перегрева и появляется возможность увеличить не только площадь теплообменной поверхности стенок кольцеобразных камер, но и температуру стенок камер:

– во-первых, за счет увеличения толщины их стенок, так как в формуле определения омического сопротивления проводника площадь сечения проводника стоит в знаменателе:

$$R = \rho \cdot l / S,$$

а в формуле мощности, выделяющейся на короткозамкнутом витке, в знаменателе стоит омическое сопротивление короткозамкнутого витка:

$$P = U_2^2 / R,$$

значит, при той же длине l короткозамкнутого витка при увеличении толщины сечения (S) короткозамкнутого витка увеличится ток через него и выделяющаяся на нем мощность:

$$P = U_2^2 / R^1,$$

где R^1 – сопротивление меньше сопротивления R ;

– во-вторых, за счет уменьшения удельного электрического сопротивления (ρ) материала короткозамкнутого витка. С точки зрения выбора материала для короткозамкнутого витка с максимальной электропроводностью таковыми являются медь и медьсодержащие сплавы. Также медь хорошо сопротивляется коррозии в обычных атмосферных условиях, в пресной и морской воде, а также других агрессивных средах.

Интересный эффект в отношении повышения температуры теплоотдающей по-

верхности короткозамкнутого витка приобретает трансформаторный нагреватель, составленный из двух трансформаторных нагревателей, у которых одни торцевые стенки, обращенные друг к другу, являются общими, а их первичные обмотки подключены к источнику питания последовательно или параллельно таким образом, что их магнитные потоки в магнитопроводах направлены в одну сторону (рис. 3).

ЭДС E_{AB} и E_{BD} , создаваемые магнитными потоками в магнитопроводах 3 и 4 на вторичных витках AB и BD , имеют одно направление. А это значит, что одновременно контур $AMND$ находится под воздействием суммарной ЭДС ($E_{AB} + E_{BD}$), а контуры $AMKB$ и $BKND$ находятся под воздействием своих ЭДС (E_{AB} и E_{BD}). Это значит, что одновременно в указанных контурах развиваются электрические мощности:

$$P_1 = E_{AD}^2 / R_{MA} + R_{MN} + R_{ND} + R_{AD};$$

$$P_2 = E_{AB}^2 / R_{AM} + R_{MK} + R_{KB} + R_{AB};$$

$$P_3 = E_{BD}^2 / R_{BK} + R_{KN} + R_{ND} + R_{DB}.$$

Если раньше в контуре $AMND$ (перегородки KB не было) был бы один магнитопровод с первичной обмоткой W_1 , подключенной на напряжение U_1 , на вторичном витке AD была бы наведена ЭДС $E_{AD} = E_{AD}$, поделилась бы мощность P_1 , а элементы контура нагрелись бы до температуры t_1 . Если в конструкции без перегородки KB обмотки 1 и 2 на своих магнитопроводах 3 и 4 включить последовательно на напряжение U_1 , то все равно на вторичном витке AD наведется ЭДС $E_{AD} = E_{AD} = 1B$, в контуре выделится мощность P_1 , а элементы контура нагреются до той же температуры t_1 .

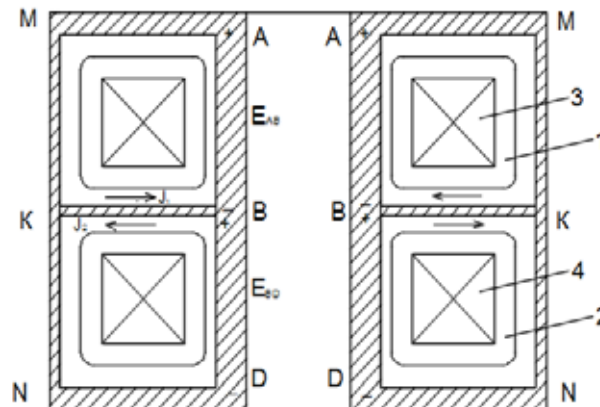


Рис. 3. Двухконтурный трансформаторный нагреватель
1, 2 – индукционная первичная обмотка, 3, 4 – замкнутый магнитопровод

Теперь, предположим, вмонтировали перегородку KB и гальванически ее соединили с MN и AD. Получилось дополнительно к контуру AMND еще два контура – AMKB и BKND. В последние два контура поместили по магнитопроводу 3 и 4 с первичными обмотками 1 и 2 с количеством витков каждая $W_1/2$. Обмотки включили последовательно и подключили к тому же напряжению U_1 . Теперь на вторичных витках каждого контура наведутся ЭДС $E_{AB} = E_{BD} = 0,5$ В. В каждом малом контуре выделяется мощность P_2 и P_3 , и элементы контуров нагреются до температуры t_1 . Но на вторичном витке AD суммарная ЭДС, так же как и раньше, будет равна 1В, и в большом контуре AMND выделится еще мощность P_1 , и элементы контуров (кроме перегородки KB) нагреются до новой температуры t_2 , в два раза выше температуры t_1 . В перегородке KB токи J_1 и J_2 малых контуров протекают во встречных направлениях; ее можно выполнять небольшой толщины, так как в ней может протекать только уравнивающий ток небольшой величины.

Результаты исследования и их обсуждение

Принимая во внимание рассмотренные процессы, можно организовать малых контуров не два, а больше и получить увеличение температуры стенок кольцеобразной камеры не в два, а в большее число раз.

Но увеличение температуры стенок кольцеобразных камер происходит за счет увеличения полезной мощности, выделяющейся на этих стенках за счет увеличения мощности, получаемой с вторичных витков, а в итоге – от сети переменного тока U_1 через первичные обмотки $W/2$. Так что повышение теплостойкости первичной обмотки путем применения полого кремнеземного шнура, оказалось кстати, так как ток через первичные обмотки при такой конструкции нагревателя будет увеличиваться. И чем больше ток, потребляемый нагревателями от источника переменного тока U_1 , тем больше будет нагрев их первичных обмоток [5]. С существующими изоляциями медных проводов ни о каких эффективных, высоконадежных и высоко-

температурных трансформаторных нагревателях речи быть не может.

Показанные на рис. 1–3 базовые варианты конструкций трансформаторных нагревателей могут быть приняты за основу для разработки нескольких вариантов высоконадежных погружных трансформаторных нагревателей для нагрева жидкостей. В каждой уже конкретной разработке на конкретную полезную мощность для конкретных условий эксплуатации необходимо выбрать материал кольцеобразной камеры и все другие элементы и параметры. Например, при небольшой величине вторичного напряжения снимаемую с поверхности камеры полезную мощность можно изменять в больших пределах изменением только сечения, толщины или материала стенки короткозамкнутого витка, при этом длина пути токопрохождения l остается неизменной.

Заключение

Свою нишу трансформаторный нагреватель займет при создании высоконадежных нагревательных устройств, которые не требуются часто переносить (то есть они устанавливаются стационарно), и для решения некоторых других задач (например, прямого нагрева). Кроме высокой надежности работы трансформаторные нагреватели имеют значительно большую поверхность теплоотдачи, чем широко известные ТЭНы, и поэтому эффективность их работы очень высока.

Список литературы

1. Кузнецов С.И., Рогозин К.И. Краткий курс физики: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 215 с.
2. Ксенофонтов А.Г. Расчет и конструирование нагревательных устройств: учебник для вузов. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 503 с.
3. Вадова Л.Ю., Юрченко А.И. Электронагревательное устройство // Патент на полезную модель РФ № 181306. Патентообладатель ФГБОУ «НГТУ им. Р.Е. Алексеева». 2018.
4. Сериков А.В., Кузьмин В.М. Электронагревательные элементы и устройства трансформаторного типа для систем энергообеспечения: монография. Владивосток: Дальнаука, 2012. 247 с.
5. Справочник по основам теоретической электротехники: учебное пособие / Под ред. Ю.А. Бычкова, В.М. Золотниченко, Е.Б. Соловьевой, Э.П. Чернышева. СПб.: Лань, 2012. 368 с.