



УДК 621.74.045
DOI: 10.21122/1683-6065-2019-1-38-44

Поступила 30.01.2019
Received 30.01.2019

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗИФИЦИРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ

О. А. ЯКОВЫШИН, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина, ул. Бульвар Вернадского, 34/1. E-mail: gu-rd@i.ua

В статье на базе проведенных исследований и имеющейся технической документации на современные бесконтактные электрические аппараты предложен подход к совершенствованию системы управления нагревательными элементами оборудования для производства газифицируемых моделей. Сообщается о теплофизических особенностях и режиме работы трубчатых электрических нагревателей (ТЭНов). Определено численное значение рабочей температуры спирали ТЭНа. Показано, что применение 3-фазных твердотельных реле (ТТР) позволило увеличить срок службы нагревательных элементов в среднем на 400–450 ч. Установлена перспективность использования ТТР в системах управления нагревом оборудования для изготовления газифицируемых моделей.

Ключевые слова. *Литье, газифицируемая модель, автоклав, нагреватель, бесконтактное управление, теплопроводность, теплоноситель.*

Для цитирования. *Яковышин, О. А. Совершенствование системы управления технологическим оборудованием производства газифицируемых моделей / О. А. Яковышин // Литье и металлургия. 2019. № 1. С. 38–44. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-38-44.*

IMPROVEMENT OF MANAGEMENT SYSTEM OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR PRODUCTION OF GASIFICABLE MODELS

O. A. YAKOVYSHIN, Physical-Technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 34/1, Academician Vernadsky ave. E-mail: gu-rd@i.ua

In the article on the basis of the conducted researches and available technical documentation on modern non-contact electric devices the approach to perfect a control system of heating element of equipment for the production of gasified models. The thermophysical features and mode of operation of heating elements used in equipment for the production of gasified models is given. The numerical value of the working temperature of the spiral of heating element is determined. It is shown that application of three phase Solid State Relays (SSR) increased the life of heating elements by an average of 400–450 hours. SSR in the systems for controlling the heating of liquid heat carrier of plants for the production of gasified models are promising.

Keywords. *Casting, gasifying model, autoclave, heater, contactless control, thermal conductivity, heat transfer medium.*

For citation. *Yakovyshin O. A. Improvement of management system of technological equipment for production of gasificable models. Foundry production and metallurgy, 2019, no.1, pp. 38–44. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-38-44.*

На современном этапе развития литейного производства (ЛП) технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) находит все более широкое распространение ввиду неоспоримых преимуществ по сравнению с такими традиционными способами, как литье в песчано-глинистые формы, по выплавляемым моделям, в металлические формы и др. Основным звеном технологической цепи получения отливок по ГМ, от которого в значительной степени зависит качество получаемой детали, является процесс изготовления полимерной модели. Широкое применение получили ванный и автоклавный способы спекания ГМ, технологическим особенностям которых посвящено значительное количество публикаций [1–5]. В то же время недостаточно освещаются аппаратурные и эксплуатационные вопросы обеспечения технологии. Как в одном, так и в другом способе производства ГМ теплопередающей средой служит вода, при этом в условиях ванного способа ее температура находится в диапазоне 98–100 °С, в автоклавном

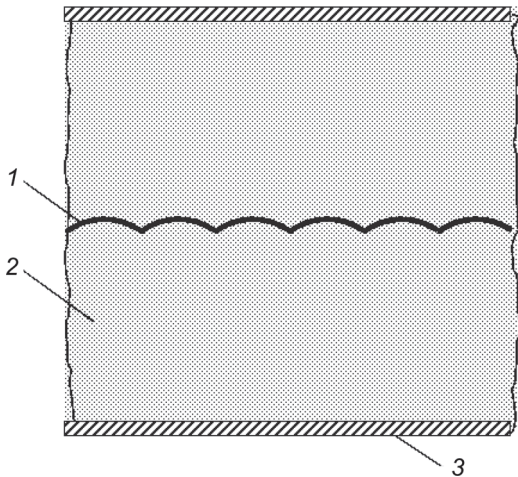


Рис. 1. Схематическое изображение участка трубчатого электронагревателя в разрезе: 1 – нагревательный элемент; 2 – электроизоляционный наполнитель; 3 – трубчатая оболочка

температура воды и ее паров достигает значений 115–120 °С при давлении 0,2 МПа. Нагрев воды проводится трубчатыми электронагревателями (ТЭНами), установленными в донной части ванны (при ванном методе спекания) или же в парогенераторе автоклава (автоклавное спекание). Применение ТЭНов в устройствах для производства ГМ обусловлено повышенной электробезопасностью, надежной защитой обслуживающего персонала от поражения электрическим током, удобством эксплуатации и т. д. ТЭН состоит из расположенной внутри металлической оболочки спирали из сплава высокого сопротивления (в основном нихром различных марок) с контактными стержнями. От стенок оболочки, выполненной в зависимости от условий эксплуатации из алюминия/меди/углеродистой/нержавеющей стали, спираль изолирована спрессованным электроизоляционным наполнителем, в качестве которого преимущественно применяют электротехнический периклаз – плавленный оксид магния (MgO). Для предохранения наполнителя от проникновения влаги из окружающей среды торцы ТЭНа герметизируют. Такое исполне-

ние позволяет осуществить гальваническую развязку с теплопередающей технологической средой. Применение открытых спиралей или нагревательных элементов в данном случае с позиции техники безопасности невозможно ввиду значительной электрической проводимости воды. Это одно из важнейших преимуществ ТЭНов по сравнению с нагревателями открытого типа, в то же время является причиной их несколько большей инерционности и более тяжелых условий работы нихромовой спирали вследствие усложнения теплоотвода. Рассматривая схематически изображенный участок ТЭНа (рис. 1), можно убедиться, что процесс переноса тепла от нихромовой спирали к жидкой теплопередающей среде характеризуется достаточной сложностью и сопряжен с преодолением многочисленных последовательных тепловых сопротивлений.

Первоначально прохождение электрического тока по нагревательной спирали способствует повышению ее температуры до определенного значения (закон Джоуля–Ленца). Затем сформировавшийся тепловой поток в виде суммы теплопроводной и радиационной составляющих теплообмена устремляется через контактное сопротивление «поверхность нагревательного элемента–электроизоляционный наполнитель», проходит через слой сыпучего электроизоляционного наполнителя, представляющего собой спрессованный огнеупорный материал, после чего, пройдя контактное сопротивление «электроизоляционный наполнитель – трубчатая оболочка», распространяется путем теплопроводности через материал трубчатой оболочки. Наконец, от поверхности ТЭНа к воде тепло переносится путем теплопроводности и конвекции. Логично предположить, что для преодоления на своем пути многочисленных тепловых сопротивлений необходима существенная мощность, выделяемая нагревательным элементом. Это, в свою очередь, влечет за собой рост его рабочей температуры, что не может не сказаться на продолжительности его работоспособности. К тому же резкие скачки подаваемого напряжения также пагубно влияют на ресурс ТЭНа. С целью уяснить теплофизические особенности функционирования ТЭНа произведем теоретический анализ температуры нагревательного элемента $t_{сп}$. Для этого воспользуемся зависимостью из [6]:

$$t_{сп} = t_T + \frac{P}{2\pi\lambda L_a} \ln \frac{D_{вт}}{d_3}, \quad (1)$$

где t_T – температура оболочки ТЭНа, °С; P – мощность ТЭНа, Вт; L_a – активная длина ТЭНа, м; $D_{вт}$ – внутренний диаметр оболочки ТЭНа, м; d_3 – эквивалентный диаметр спирали, равный диаметру такого цилиндрического стержня, тепловой поток от которого при прочих одинаковых условиях был бы равен тепловому потоку от нагревательного элемента, м; λ – коэффициент теплопроводности спрессованного периклаза, Вт/(м·°С).

Для того чтобы в результате математических преобразований получить численное значение температуры нагревательного элемента, далее будем оперировать конкретными параметрами отдельно взятого ТЭНа автоклава ГК-100, установленного на модельном участке ФТИМС НАН Украины (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Исходные данные для расчета

$P, \text{Вт}$	$L_a, \text{м}$	$D_{\text{вТ}}, \text{м}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$d_{\text{пр}}, \text{м}$	$h, \text{м}$	$d_{\text{сп}}, \text{м}$
2000	0,72	0,011	1,3	0,0005	0,003	0,005

На основании имеющегося опыта эксплуатации ТЭНов и в соответствии с выработанными рекомендациями приближенное значение температуры t_T оболочки ТЭНов, погруженных в легкоподвижные капельные жидкости и, в частности, в воду, можно считать на 5–15 °С превышающей температуру основной массы среды [6], т. е. если максимальное значение рабочего давления автоклава принять равным 0,2 МПа, отсюда максимальная рабочая температура достигает 119,62 °С, следовательно, t_T не превышает 124,62–134,62 °С. Для расчетов возьмем максимальное значение этого диапазона температур, т. е. 134,62 °С. Коэффициент теплопроводности периклаза примем для плотности 2500 кг/м³. Эквивалентный диаметр спирали можно определить из соотношения [6]:

$$d_3 = D_{\text{вТ}} \left[\frac{0,5\pi D_{\text{вТ}} d_{\text{пр}}}{h(d_{\text{сп}} + 0,5d_{\text{пр}})} \right]^{\frac{h(D_{\text{вТ}} - d_{\text{сп}} - 0,5d_{\text{пр}})}{h(d_{\text{сп}} + 0,5d_{\text{пр}})0,5\pi D_{\text{вТ}} d_{\text{пр}}}}, \quad (2)$$

где $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки, из которой изготовлен нагревательный элемент, м; h – шаг витков спирали, м; $d_{\text{сп}}$ – диаметр витка спирали по средней линии, м.

На практике с несущественным снижением точности вычислений более удобно d_3 рассчитать по следующей формуле [6]:

$$d_3 \approx D_{\text{вТ}} \left(\frac{2D_{\text{вТ}}}{Kd_{\text{сп}}} \right)^{\frac{K(D_{\text{вТ}} - d_{\text{сп}})}{Kd_{\text{сп}} - 2D_{\text{вТ}}}}, \quad (3)$$

где коэффициент $K = \frac{h}{d_{\text{пр}}}$; h – шаг витков спирали, м; $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки, из которой изготовлен нагревательный элемент, м; $d_{\text{сп}}$ – диаметр витка спирали по средней линии, м.

В результате подстановки численных значений в выражения (1) и (3) было установлено, что температура $t_{\text{сп}}$ нагревательного элемента равна 609,79 °С. Конечно же, данное значение температуры не может быть принято без целого ряда условий. К примеру, снижение пористости периклаза (на этапе изготовления ТЭНа) увеличивает его коэффициент теплопроводности, а, следовательно, снижается температура нагревательного элемента. С другой стороны, отложение накипи за счет выпадения из жидкости различных веществ на рабочей поверхности ТЭНа, эксплуатируемого в жесткой воде, значительно препятствует отводу от него тепла и приводит к существенному повышению температуры периклаза и нагревательного элемента (иногда на несколько сотен градусов). Согласно [7], работоспособность нихромовой проволоки Х15Н60 диаметром 4 мм при 1000 °С составляет 1000 ч, при 1100 °С – уже 200 ч, а при 1200 °С снижается до 30 ч. Представляется очевидная зависимость: чем выше рабочая температура, тем ниже срок эксплуатации нагревательного элемента. Рекомендуемые максимальные рабочие температуры нагревательного элемента из указанного сплава для производства ТЭНов в зависимости от диаметра проволоки: 0,2 мм–900 °С; 0,4 мм–950 °С; 1 мм–1000 °С [8]. Не следует также забывать, что в процессе эксплуатации в объеме ТЭНа проходят кроме физических еще и химические процессы, проявляющиеся во взаимодействии периклаза с металлом оболочки и со сплавом высокого сопротивления. С течением времени это приводит к межкристаллитной коррозии структуры элемента сопротивления, что связано с разупрочнением сплава и снижением в нем содержания хрома (нагревательный элемент становится хрупким), а также к уменьшению диаметра проволоки элемента сопротивления. Именно с уменьшением диаметра проволоки элемента сопротивления связывают некоторое снижение мощности ТЭНов во времени в процессе эксплуатации. Величина его электрического сопротивления подчинена известной зависимости:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (4)$$

где R – сопротивление нагревательного элемента, Ом; ρ – удельное сопротивление материала проводника, (Ом·мм²)/м; l – длина проводника, м; S – площадь сечения проводника, мм².

Определено, что при неизменной длине спирали при уменьшении площади ее сечения сопротивление нагревательного элемента возрастает.

Уравнение, связывающее суммарную мощность соединенных в звезду нагревательных элементов (для симметричной трехфазной цепи) и их сопротивлений, имеет вид:

$$P = \frac{3U_{\phi}^2}{R} \cos \varphi, \quad (5)$$

где P – суммарная мощность ТЭНов в установке, Вт; U_{ϕ} – фазное напряжение (в данном случае равно 220 В), В; R – общее сопротивление ТЭНов, подключенных к одной фазе, Ом; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности (для активной нагрузки, которой является ТЭН, равен 1).

Легко увидеть, что увеличение R влечет за собой снижение суммарной мощности ТЭНов. Далее можно привести достаточно много примеров, демонстрирующих степень влияния различных технических параметров установки и технологических особенностей процесса производства ГМ как на повышение, так и на понижение температуры нагревательного элемента, но уже тот факт, что его температура достигает столь значительной величины, свидетельствует о необходимости и важности управления процессом выхода на рабочую температуру.

Здесь позволим себе сделать некоторое отступление от основного содержания статьи. Люди старшего поколения наверняка помнят ламповые сетевые радио- и телеприемники, отличительной особенностью которых было то, что после их включения проходило несколько десятков секунд прежде чем они выходили на рабочий режим. Связано это с тем, что в конструкциях приборов применялись электронные лампы с подогревным катодом, представляющим собой никелевую трубочку, внутри которой проходит подогревающая спираль, изолированная от катода алундом или фарфором. Изобретателем подогревного катода является наш соотечественник академик А. А. Чернышев. После многочисленных экспериментов он пришел к выводу, что для устойчивой работы электронной лампы вовсе не обязательно, чтобы ток накала (в результате которого нагревается катод и излучает стабильный пучок электронов, формируя таким образом ток от анода к катоду) проходил бы непосредственно по катоду. Необходимым условием является то, чтобы катод был все время равномерно нагрет до требуемой температуры. Возникает резонный вопрос – почему не пропустить ток непосредственно по катоду электронной лампы, ведь это ускоряет процесс формирования электронов, уменьшает тепловую инерцию системы, в результате чего более экономно расходуется энергия источника питания? Именно так и делали в случае питания приборов от источников постоянного напряжения (к примеру, аккумуляторов или гальванических элементов). Попытки нагревать катоды прямого нагрева сетевым током (как альтернативным и более дешевым источником питания) были мало удачными. Частота нашей промышленной сети составляет 50 Гц. Это значит, что за 1 с происходит 50 полных колебаний, т. е. периодов переменного тока. Поэтому катод прямого нагрева, представляющий собой в таких электронных лампах тонкую нить, нагревается пропускаемым по ней током, накаляется и остывает 100 раз в секунду, так как для нити абсолютно безразлично, в какую сторону течет ток. За первый полупериод нить накаляется, когда ток возрастает, а когда он уменьшается до нуля, чтобы изменить свое направление, нить несколько остывает. Исходя из этого, и пучок электронов, вылетающий из нити, формируется нестабильным во времени, что приводит к нарушению нормального функционирования электронной лампы. Массивная же конструкция подогревного катода позволяет ценой увеличения инерционности системы получить постоянное и равномерное распределение температуры по всей поверхности такого катода, а отсюда – температура подогревного катода никак не сможет изменяться с удвоенной частотой питающего тока, как это наблюдается у катода с прямым накалом. Таким образом, между подогревным катодом электронной лампы и ТЭНом наблюдается некоторая аналогия. Нить катода – это спираль ТЭНа, алундовый изолятор в конструкции лампы выполняет те же функции, что и периклаз в конструкции ТЭНа, а никелевая трубочка подогревного катода подобна трубке ТЭНа. Конечно же, необходимо признать условность данного сравнения и справедливо возразить, что материалы, из которых изготовлена нить накаливания катода и спираль ТЭНа существенно отличаются по своим электротехническим характеристикам, также разнятся и диаметры этих конструктивных элементов. В то же время, процессы, происходящие в ТЭНе, подобны тем, которые проходят в подогревном катоду электронной лампы, пусть и не так ярко выражено и с большей инерционностью. Более того, если электронная лампа после подачи питания и отработки переходного процесса выходит на установившийся режим и пребывает в нем до снятия напряжения (время может исчисляться часами, днями и т. д.), то на ТЭН в пределах одной рабочей смены десятки раз может подаваться и отключаться напряжение, а, следовательно, с этой точки зрения он пребывает в значительно более экстремальных условиях.

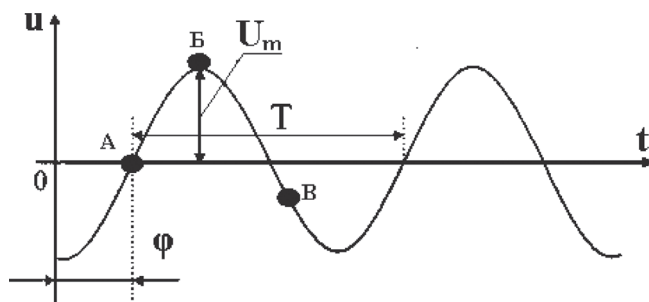


Рис. 2. Однофазная система переменного напряжения: u – ось переменного напряжения; U_m – амплитудное значение напряжения; t – ось времени; T – период изменения напряжения; φ – фазовый угол. $A/B/B$ – любые случайные точки, в которых может произойти коммутация напряжения на ТЭН

Особенностью современных систем управления оборудования для производства ГМ является наличие в них электромагнитного пускателя (ЭМП), с помощью которого осуществляется подача силового напряжения на ТЭНы установки. На сегодня это один из наиболее широко распространенных видов пусковой аппаратуры, отличающийся простотой конструкции и надежностью. В то же время, управление на основе ЭМП имеет и некоторые особенности. Эксплуатируя магнитные пускатели, необходимо тщательно следить за чистотой и степенью износа их контактов. Момент размыкания контактов сопровождается образованием электрической дуги, являющейся причиной их подгорания и «залипания» магнитной системы. Кроме того, ЭМП характеризуются значительной мощностью потребления цепей управления, неодновременностью подключения фаз, присутствием механических подвижных частей, ограниченной частотой включений, недостаточным быстродействием отключения при срабатывании защиты. Одним из существенных недостатков ЭМП является также и то, что к нагрузке в момент коммутации прикладывается абсолютно случайная величина мгновенного напряжения (рис. 2).

На примере однофазной системы переменного напряжения показано, что ЭМП может включиться в момент, когда на его силовых клеммах мгновенное значение напряжения находится, например, в точке $A/B/B$ либо в любой другой случайный момент времени. При этом самой неблагоприятной является точка B , поскольку в этом случае через нагрузку сразу же начинает проходить максимальный ток. Кроме того, что в таком случае в питающей сети формируются электромагнитные помехи, к тому же выход нагревателя на рабочую температуру происходит неуправляемо и скачкообразно. При подаче напряжения на ТЭН перегрузка по току возникает из-за того, что в момент включения спираль ТЭНа имеет низкую температуру по сравнению с температурой в рабочем режиме. Как показали наши измерения, после некоторой наработки 2-киловаттных ТЭНов автоклавов ГК-100 холодная спираль имела примерно в 1,12 раза меньшее сопротивление, чем спираль в рабочем нагретом состоянии. Учитывая то, что нихром обладает положительным температурным коэффициентом электрического сопротивления, с повышением температуры увеличивается и его электрическое сопротивление, т. е. холодная спираль (при одном и том же напряжении) пропускает через себя большой ток (а отсюда и большая мощность, выделяемая на ней на переходном процессе) по сравнению с той же спиралью в нагретом состоянии. Вот почему зачастую именно во время подачи напряжения на ТЭН происходит перегорание его спирали. Необходимо также отметить, что нагревательный элемент представляет собой далеко не идеальную в структурном отношении систему. И эта неидеальность для нагревательных элементов с меньшим поперечным сечением проявляется более явно, чем у нагревательных элементов с большим поперечным размером. В кристаллической структуре нагревателя всегда присутствуют внутренние и поверхностные дефекты в виде трещин, чужеродных включений (пленок оксидов и т. д.), инициирующих концентрированное увеличение сопротивления, что в свою очередь способствует местному перегреву спирали и ускоренному окислению в местах перегрева, и как результат – к уменьшению сечения нагревателя в этих точках. С течением времени процесс окисления с образованием коррозионных язв в данных точках будет ускоряться, интенсифицировать уменьшение сечения нагревателя, способствуя лавинообразному возрастанию местной температуры, что и приведет к перегоранию спирали и обрыву электрической цепи.

Все вышесказанное подтверждает мысль о том, что в условиях значительной частоты срабатываний и высокого быстродействия ЭМП уже не могут отвечать возросшим требованиям современной промышленности. В свою очередь, интенсивное развитие микроэлектроники способствует созданию новой элементной базы исполнительной аппаратуры, например, тиристорных пускателей или твердотельных реле (ТТР), предназначенных для бесконтактной коммутации нагрузки и ее защиты в случае возникновения

аварийных режимов [9–11]. ТТР представляют собой модульные полупроводниковые приборы, выполненные по гибридной технологии, основу которых составляют мощные силовые ключи на симисторных, тиристорных либо транзисторных структурах. В настоящее время существуют различные модификации ТТР, отличающиеся по типу нагрузки, диапазону коммутируемого напряжения, типу управления, способу коммутации. Именно способ коммутации в нашем случае является определяющим. ТТР с контролем перехода через нуль при подаче управляющего сигнала обеспечивают подачу напряжения на ТЭН в момент первого пересечения линейным напряжением нулевого уровня, т. е. в точке *A* (рис. 2), что позволяет уменьшить начальный бросок тока (пусть даже и небольшой, учитывая то, что ТЭН является резистивной нагрузкой), и, как следствие, увеличить срок службы ТЭНов. Задача системы управления автоклавом, в частности, и заключается в том, чтобы избежать «шокового» включения и создать условия для подготовленной подачи напряжения, т. е. плавного вхождения ТЭНа в работу. По сравнению с контактными аппаратами бесконтактные имеют преимущества: высокое быстродействие, управляемый и постепенный выход на низкие энергопотребление и уровень электромагнитных помех, отсутствие акустического шума, механического износа, дребезга контактов и искрения при переключениях. Конечно же, ТТР в свою очередь также не лишены недостатков: глубина коммутации у них на несколько порядков меньше, чем у контактных аппаратов; они не создают видимого разрыва в цепи и не обеспечивают гальванической развязки в ней, что важно с точки зрения соблюдения правил техники безопасности; падение напряжения на полупроводниковом элементе в проводящем состоянии при номинальном токе примерно в 50 раз больше, чем в обычных контактах, что определяет большие тепловые потери в полупроводниковом элементе в режиме длительного тока и необходимость в специальных охлаждающих устройствах; для обеспечения их надежной защиты в цепи необходимо устанавливать быстродействующие предохранители, плюс ко всему их габариты, масса и стоимость на сопоставимые по параметрам ЭМП на сегодняшний день выше, т. е. все вышеизложенное свидетельствует о том, что при выборе конкретного устройства нужно исходить из условий его функционирования. Если, к примеру, для ванны подвспенивания исходного бисера полистирола количество включений равняется 1 (здесь нет регулировки по температуре и отключение устройства может произойти, когда уровень теплоносителя снизится ниже заданной отметки) за один цикл подвспенивания и, к тому же, она работает в течение смены непродолжительное время, то в данном случае можно ограничиться применением в системе управления ЭМП. Для автоклавов, парогенераторов количество включений может достигать 50 и более в час (в зависимости от диапазона уставки рабочего давления, времени и режимов спекания модели, производительности работы и т. д.) и в таком случае перевод системы управления на ТТР с технических позиций является оправданным.

Поскольку анализ технических особенностей обоих типов приборов привел нас к заключению о функциональных преимуществах ТТР по сравнению с ЭМП (для определенной области применений), были проведены прямые испытания (длительностью около двух лет) по изучению влияния указанных типов приборов коммутации на эксплуатационный ресурс ТЭНов. Через каждую тысячу часов наработки производили измерение с помощью прибора В7–27А/1 электрического сопротивления спиралей ТЭНов в холодном состоянии. В результате обработки статистической информации построили зависимость отношения сопротивлений спиралей ТЭНов (по 6 шт. в обеих испытываемых группах), коммутируемых ЭМП (R_1) и ТТР (R_2), от времени наработки (рис. 3). В процессе эксперимента ТЭНы имели достаточно квалифицированное обслуживание (заключающееся в периодической очистке их от накипи и постоянном слежении за состоянием соединений, крепежных деталей и электрических кабелей). Отмечалось по одному слу-

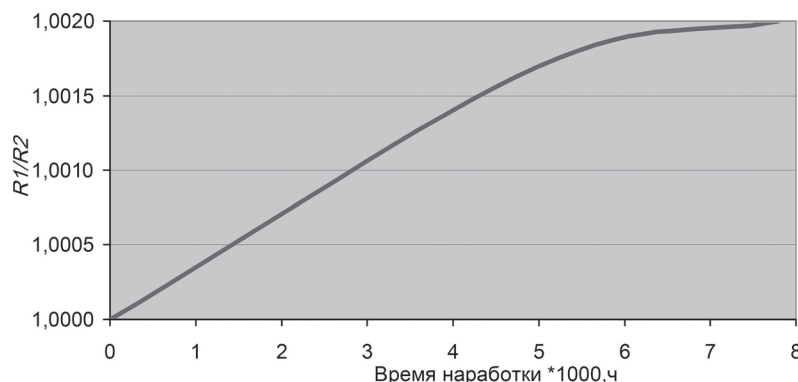


Рис. 3. Зависимость изменения отношения R_1/R_2 с течением времени эксплуатации

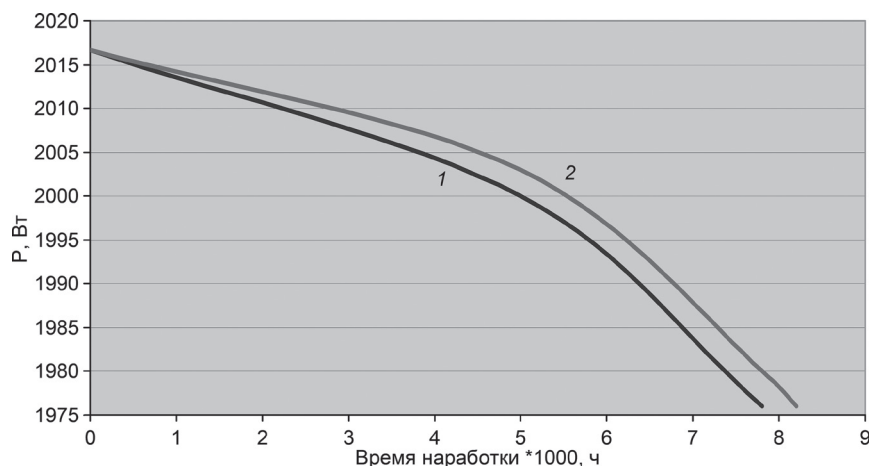


Рис. 4. Зависимость изменения мощности ТЭНа с течением времени эксплуатации. 1 – для ТЭНа, коммутируемого ЭМП; 2 – для ТЭНа, коммутируемого ТТР

чаю в каждой испытуемой группе выхода ТЭНов из строя (на раннем временном промежутке опыта до 1000 ч наработки) по причине перегорания спирали. Указанные обстоятельства связали с вероятным браком нагревателей на этапе их изготовления. Расчетные зависимости изменений мощностей ТЭНов, коммутируемых ТТР и ЭМП, приведены на рис. 4. Установлено, что в случае применения ТТР в качестве коммутационного оборудования ресурс ТЭНов увеличился в среднем на 400–450 ч по сравнению с ТЭНами, коммутируемыми ЭМП. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности применения ТТР в системах управления нагревом ванн и автоклавных установок для изготовления ГМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
2. Литье по газифицируемым моделям // Сб. науч. тр. Киев: АН УССР. Ин-т проблем литья, 1975. Вып. 2. 193 с.
3. Литье по газифицируемым моделям // Сб. науч. тр. Киев: АН УССР. Ин-т проблем литья, 1979. 168 с.
4. Шинский О. И. Газогидродинамика и технологии литья железоуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям: дис. ... д-р техн. наук, Киев, 1997. 481 с.
5. Яковьшин О. А. Исследование теплофизических особенностей установок с жидким теплоносителем для производства газифицируемых моделей // *Металл и литье Украины*. 2009. № 7–8. С. 37–41.
6. Белавин Ю. А., Евстигнеев М. А., Чернявский А. Н. Трубочатые электрические нагреватели и установки с их применением. М.: Энергоатомиздат, 1989. 160 с.
7. Таблицы физических величин: справ. / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
8. Справочник по электротехническим материалам. Т. 3 / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 728 с.
9. Fotek. Solid State Module. Datasheets. 32 p.
10. Fotek. SSR Series. Datasheets. 13 p.
11. Opto22. Solid-State Relays. Datasheets. 23 p.

REFERENCES

1. Shuljak V. S. *Lit'e po gazificiruemykh modeljam* [Lost foam casting]. Sankt-Petersburg, NPO Professional Publ., 2007. 408 p.
2. *Lit'e po gazificiruemykh modeljam* [Lost-foam casting]. Collection of scientific papers. Kiev, Academy of Sciences of USSR. Institute for Problems in Casting, 1975. Is. 2. 193 p.
3. *Lit'e po gazificiruemykh modeljam* [Lost-foam casting]. Collection of scientific papers. Kiev, Academy of Sciences of USSR. Institute for Problems in Casting, 1979. 168 p.
4. Shinskij O. I. *Gazogidrodinamika i tehnologii litya zhelezouglerodistykh i cvetnykh splavov po gazificiruemykh modeljam*. Diss. dokt. tehn. nauk [Gas-hydrodynamic and technology of casting from ferro-carbon and non-ferrous alloys by Lost-foam casting. Dr. techn. sci. diss.]. Kiev, 1997. 481 p.
5. Yakovyshin O. A. *Issledovanie teplofizicheskikh osobennostey ustanovok s zhidkim teplonositelem dlya proizvodstva gazifitsiruemykh modeley* [Investigation of thermophysical features of units with a liquid heat carrier for the production of gasified models]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting in Ukraine*, 2009, no. 7–8, pp. 37–41.
6. Belavin Yu. A., Evstigneev M. A., Chernyavskiy A. N. *Trubchatye elektricheskie nagrevateli i ustanovki s ikh primeneniem* [Tubular electric heaters and installations with their application]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 160 p.
7. *Tablitsy fizicheskikh velichin* [Tables of physical quantities]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1008 p.
8. *Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam* [Handbook of electrotechnical materials]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1988. 728 p.
9. Fotek. Solid State Module. Datasheets. 32 p.
10. Fotek. SSR Series. Datasheets. 13 p.
11. Opto22. Solid-State Relays. Datasheets. 23p.