

*setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2013, no. 2, pp. 40–47.

16. Khrumshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Otsenka metodov shirotno-impul'snoy modulyatsii napryazheniya aktivnykh vypryamiteley prokatnykh stanov [Evaluation of the methods of rolling mill active rectifier voltage PWM]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2013, no. 2, pp. 48–52.

17. Maklakov, A.S., Radionov, A.A. Issledovanie vektornoy ShIM s razlichnymi tablitsami pereklyucheniya silovykh klyuchey trekhurovnevoogo preobrazovatelya [A study of the three-level converter space-vector PWM with various vector selection tables]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 30–37.

18. Maklakov, A.S. Analiz raboty aktivnogo vypryamiteleya napryazheniya v rezhimakh kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Analysis of active rectifier operation in reactive power compensation modes]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2013, no. 1, pp. 43–50.

19. Luk'yanov, S.I., Shvidchenko, N.V., Pishnograev, R.S., Shvidchenko, D.V. Razrabotka matematicheskoy modeli elektroprivoda otvodyashchego rol'ganga shirokopolosnogo stana goryachey prokatki [Development of a mathematical model of the broad-strip hot mill outgoing table electric drive]. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh*, 2011, no. 1–2, pp. 71–76.

*Николаев Александр Аркадьевич,*

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

*Nikolaev Aleksandr Arkadyevich,*

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Head of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

*Денисевич Александр Сергеевич,*

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, e-mail: denisevich993@mail.ru

*Denisevich Aleksandr Sergeevich,*

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Post-graduate student of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, e-mail: denisevich993@mail.ru

*Ивеев Владимир Сергеевич,*

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, e-mail: vivekeev@yandex.ru

*Ivekeev Vladimir Sergeevich,*

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Post-graduate student of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, e-mail: vivekeev@yandex.ru

УДК 621.365.5

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОГНЕУПОРНОЙ ФУТЕРОВКИ ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

И.Ю. ДОЛГИХ, М.Г. МАРКОВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Широкий спектр технологических преимуществ индукционных тигельных плавильных печей делает актуальным их использование в различных отраслях металлургического производства. Однако тяжелые условия работы огнеупорной футеровки таких печей обуславливают необходимость осуществления постоянного контроля за ее состоянием, ориентированного на продление срока службы тигля и предотвращение возникновения аварийных ситуаций. При этом традиционные методы, основанные на использовании подового электрода и индикации утечки тока на землю, не обеспечивают непрерывного отображения степени разрушения футеровки и дают возможность регистрации только критического уровня, требующего аварийного отключения и опорожнения печи. Указанное обстоятельство

ство требует разработки и внедрения специализированных электротехнических комплексов с системой мониторинга и управления, обеспечивающей определение и визуализацию уровня износа футеровки и в случае необходимости аварийное отключение оборудования от источника питания.

**Материалы и методы.** В основе разрабатываемого комплекса лежит микропроцессорная система, осуществляющая непрерывное измерение температуры в контрольных точках на границе слоев подины и основания тигля и сравнение полученных значений с уставками, которые определяются предварительно на двумерной осесимметричной модели проектируемой печи путем решения стационарного уравнения теплопроводности при различном уровне разрушения футеровки.

**Результаты.** Разработаны структура, схема и программа для микропроцессорной системы мониторинга и аварийного отключения индукционной печи, а также математическая модель объекта управления, позволяющая определять уставки по температуре. Достоверность результатов подтверждается адекватностью моделей реальным объектам, а также отладкой микропроцессорной части в программах MPLab-Sim и Proteus.

**Выводы.** Полученные результаты могут быть использованы при практической реализации системы мониторинга и аварийного отключения индукционных плавильных печей, позволяющей повысить безопасность их эксплуатации и продлить срок службы футеровки за счет своевременного ремонта.

**Ключевые слова:** индукционные тигельные печи, огнеупорная футеровка, система мониторинга и управления, термopара, микроконтроллер

## DEVELOPMENT OF A CONDITION MONITORING SYSTEM FOR THE REFRACTORY LINING OF INDUCTION CRUCIBLE STEELMAKING FURNACES

I.Yu. DOLGIKH, M.G. MARKOV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru

### Abstract

**Background.** A wide range of technological advantages of induction crucible melting furnaces makes their use in various sectors of metallurgical production relevant. However, hard operation conditions of the refractory lining of such furnaces makes it necessary to constantly monitor its condition, with the aim to extend the crucible life and prevent emergencies. Moreover, traditional methods based on the use of a bottom electrode and indication of current leakage to earth do not provide a continuous display of the lining destruction degree and make it possible to register only a critical level that requires an emergency shutdown and emptying of the furnace. This circumstance makes it necessary to develop and implement specialized electrical systems with a monitoring and control system that ensures the determination and visualization of the lining wear level and, if necessary, makes an emergency shutdown of the equipment from the power source.

**Materials and methods.** The developed complex is based on a microprocessor system that continuously measures the temperature at the control points at the boundary between the bottom and crucible base layers and compares the obtained values with the settings, which are determined previously on a two-dimensional axisymmetric model of the designed furnace by solving the stationary heat conduction equation at various levels of lining failure.

**Results.** We have developed the structure, scheme, and program for a microprocessor-based monitoring and emergency shutdown system of an induction furnace, as well as a mathematical model of the control object, which allows determining the temperature settings. The reliability of the results is confirmed by the applicability of the models to real objects, and is verified by debugging the microprocessor part in the MPLab-Sim and Proteus programs.

**Conclusions.** The obtained results can be used in the practical implementation of the monitoring system and emergency shutdown of induction melting furnaces, which allows increasing the safety of their operation and extending the lining life due to timely repair.

**Key words:** induction crucible furnaces, refractory lining, monitoring and control system, thermocouple, microcontroller

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.058-066

**Введение.** В настоящее время в металлургической и перерабатывающей отрасли широко распространение получили

индукционные тигельные печи, применяющиеся для расплавления, перегрева и выдержки металла при производстве вы-

сококачественных легированных сталей и синтетического чугуна, а также алюминия, меди и сплавов на их основе [1, 2]. Интенсивная электродинамическая циркуляция расплава в тигле, высокая производительность и другие технологические преимущества таких печей [3–5] обеспечивают быстрое плавление мелкой шихты и возможность получения чистых многокомпонентных сплавов строго заданного химического состава. В то же время простота управления величиной передаваемой в загрузку тепловой энергии дает возможность создания полностью автоматизированных электротехнических комплексов [6–9], обеспечивающих соблюдение технологии процесса плавки, а также контроль состояния и режима работы используемого оборудования.

Одним из наиболее уязвимых элементов индукционных плавильных печей является огнеупорная футеровка тигля, внутренняя поверхность которого подвергается в процессе работы термическим, механическим, эрозионным и химическим воздействиям [10, 11], что служит причиной ее постепенного разрушения. Указанное обстоятельство обуславливает необходимость проведения мероприятий по контролю состояния футеровки, способных предупредить возникновение аварийных ситуаций. При этом помимо периодических методов обследования, заключающихся в визуальном осмотре и измерении диаметра тигля, актуально использование специализированных электротехнических систем, основанных на фиксации отклонений технологических параметров печи при изменении условий ее работы. Одним из таких параметров является температура в отдельных точках футеровки, контроль которой может быть осуществлен посредством использования термоэлектрических датчиков в виде термопар. На их основе может быть построена система управления, ориентированная на определение степени износа футеровки, путем непрерывного измерения температуры и ее сравнения с контрольными значениями. При достижении температурой критической величины система управления отключает питание печи и сигнализирует о необходимости аварийного слива металла.

На рис. 1 представлен эскиз огнеупорной футеровки индукционной сталеплавильной печи с массой загрузки

$G_T = 400$  кг. Основными ее элементами являются тигель 1, выполненный из кислой набивной массы на основе кварцита, асбестовый теплоизолирующий слой 2 и подина 3 из шамотного кирпича. Внутренний диаметр поверхности тигля  $D_1$  принят равным 0,296 м, наружный –  $D_2 = 0,498$  м, толщина указанного слоя –  $b_1 = 0,15$  м. Конструкция печи позволяет разместить датчики измерения температуры в контрольных точках на границе слоев кислой футеровки и шамотного кирпича, что может быть положено в основу создания системы контроля состояния футеровки основания тигля. Однако это требует наличия данных о температуре в контрольных точках при исходном состоянии основания тигля и различных степенях его разрушения. Указанные параметры могут быть получены посредством использования современных программных средств компьютерного моделирования на основе метода конечных элементов путем решения стационарной тепловой задачи.

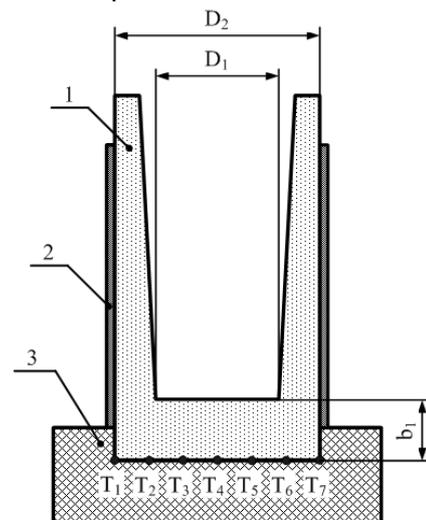


Рис. 1. Эскиз огнеупорной футеровки индукционной тигельной сталеплавильной печи

**Методы и модели.** Геометрия двумерной модели, построенной в программном комплексе COMSOL Multiphysics с учетом осевой симметрии, представлена на рис. 2. Лежащее в основе решения задачи стационарное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах имеет вид [12]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $r, z$  – пространственные координаты, м;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $T$  – температура, К.

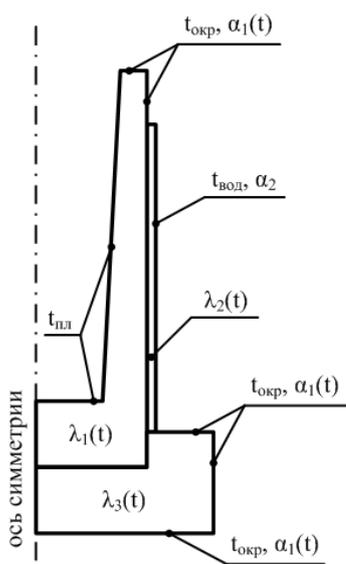


Рис. 2. Геометрия двумерной осесимметричной модели индукционной печи

При этом для используемых при изготовлении футеровки печи материалов температурная зависимость коэффициента теплопроводности может быть аппроксимирована линейными характеристиками следующего вида [3, 13]:

$$\lambda_1 = 0,45 + 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp}; \quad (2)$$

$$\lambda_2 = 0,13 + 0,26 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp}; \quad (3)$$

$$\lambda_3 = 0,7 + 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp}, \quad (4)$$

где  $\lambda_1$  – теплопроводность слоя кислой футеровки, Вт/(м·К);  $\lambda_2$  – теплопроводность асбеста, Вт/(м·К);  $\lambda_3$  – теплопроводность шамотного кирпича, Вт/(м·К);  $t_{cp}$  – средняя температура слоя, °С.

Настройка граничных условий включает в себя ввод температуры расплавленного металла (для стали  $t_{пл} = 1600$  °С) на внутренних границах модели, а также выражения расчета нормальной составляющей плотности теплового потока на внешних границах:

$$q = \alpha (T_{окр} - T), \quad (5)$$

где  $T$  – температура поверхности слоя, К;  $T_{окр}$  – температура окружающей среды, К;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К).

При этом на внешних границах футеровки печи, контактирующих с окружающим воздухом, задаются температура  $t_{окр} = 20$  °С и функциональная температурная зависимость коэффициента теплоотдачи естественной конвекцией  $\alpha_1(t)$ , вид которой представлен на рис. 3. К по-

верхности асбестового слоя примыкают витки водоохлаждаемого индуктора, что требует ввода на соответствующей границе среднего значения температуры воды ( $t_{вод} = 45$  °С) и коэффициента теплоотдачи вынужденной конвекцией ( $\alpha_2 = 1845$  Вт/(м²·К)), величина которого определяется предварительно по инженерным методикам [3].

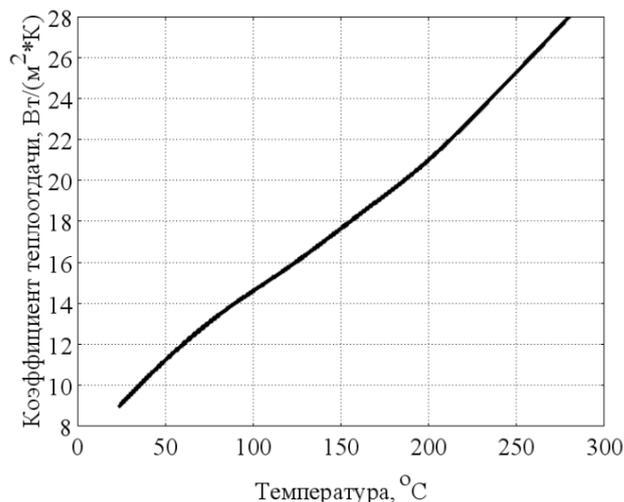


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи естественной конвекцией

Разработанная модель позволила получить распределение температурного поля вдоль границы слоев подины печи (рис. 4), а также определить численные значения температуры в выбранных контрольных точках (см. таблицу) при различном уровне износа внутренней поверхности основания тигля.

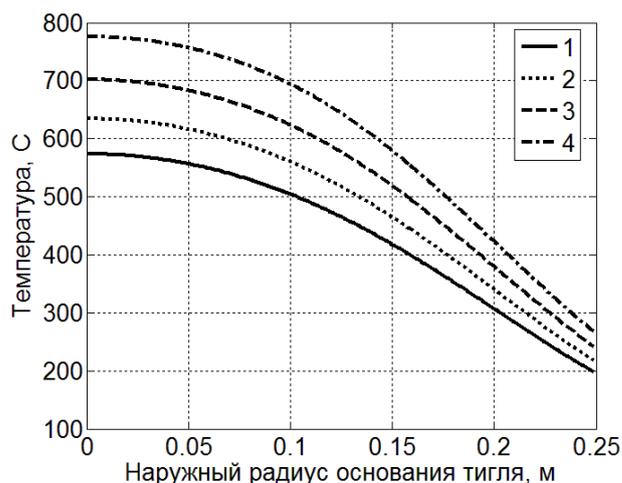


Рис. 4. Распределение температуры вдоль границы слоев подины и основания тигля индукционной печи: 1 – исходная толщина основания тигля; 2 – разрушение 10 %; 3 – разрушение 20 %; 4 – разрушение 30 %

## Результаты исследования влияния разрушения слоя кислой футеровки подины на температуру в контрольных точках

Толщина основания тигля, м	Степень разрушения, %	Температура, °С			
		контрольные точки $T_1$ и $T_7$	контрольные точки $T_2$ и $T_6$	контрольные точки $T_3$ и $T_5$	контрольная точка $T_4$
0,15	0	198,095035	384,429556	526,37441	573,752635
0,1485	1	198,392804	387,316502	531,039052	578,861916
0,1455	3	202,584617	395,935187	542,448786	590,883906
0,1425	5	206,872525	404,762464	554,105181	603,136532
0,135	10	217,858182	427,486296	584,077955	634,549225
0,1275	15	229,502867	451,690401	615,782138	667,546978
0,12	20	241,683089	477,215667	649,072573	701,977915
0,1125	25	254,467671	504,286299	684,178932	738,016983
0,105	30	267,852547	532,984907	721,19494	775,718394

Представленные результаты были использованы в качестве контрольных параметров при реализации микропроцессорной системы контроля состояния футеровки, направленной на предупреждение о начале процесса разрушения и отключение установки от источника питания при достижении критического уровня.

Простейшая система мониторинга состояния футеровки тигля включает в себя одну термопару, усилитель, микроконтроллер с АЦП и блок индикации со светодиодами и реле (рис. 5). Сигнал от термопары усиливается, оцифровывается при помощи АЦП и сравнивается с запрограммированными в микроконтроллере уставками. Результат сравнения отображается свечением сигнальных светодиодов, каждый из которых соответствует определенной теоретически степени разрушения тигля. При достижении критического уровня износа, при котором эксплуатация печи является недопустимой, в устройстве индикации сраба-

тывает реле, осуществляющее аварийное отключение питания установки.

В то же время практическая реализация системы мониторинга состояния огнеупорной футеровки требует установки в ней множества термодпар, увеличение числа которых повышает вероятность своевременного выявления дефектов печи. Поставленная задача может быть решена посредством установки требуемого количества одноканальных мониторов и объединения выходных сигналов аварийных реле. Однако такое техническое решение требует большого количества электронных блоков, в связи с чем его использование является нерациональным.

Более перспективной представляется разработка многоканальной системы (рис. 6), состоящей из одного или нескольких блоков измерения температуры (концентратор) и блока индикации (индикатор).

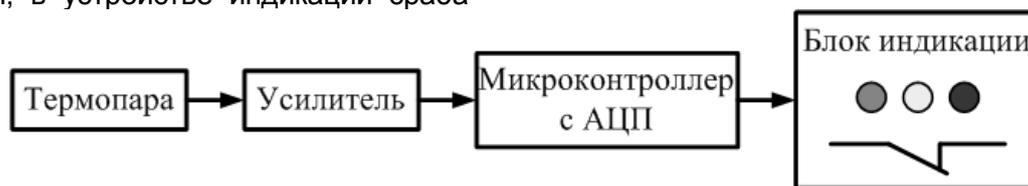


Рис. 5. Структурная схема одноканального монитора состояния футеровки тигля



Рис. 6. Структурная схема многоканального монитора с одним концентратором

Многоканальный монитор снимает данные с термопар и передает их по последовательному интерфейсу в блок индикации, сравнивающий температуры с уставками и отображающий результаты на светодиодной матрице. При этом идеология отображения результатов в индикаторе может быть реализована аналогично одноканальному варианту при использовании светодиодной панели, вид которой соответствует расположению термопар в кладке печи.

Представленная структурная схема может быть положена в основу реализации системы мониторинга огнеупорной футеровки с необходимым количеством термопар, подключаемых на вход концентратора с требуемым числом каналов. В качестве примера на рис. 7 представлена упрощенная схема многоканального монитора, построенная на основе восьмиканального коммутатора, использование которого дает возможность получения сигнала с семи термопар, а также данных, характеризующих смещение нуля усилителя. В то же время к одному из входов микроконтроллера с АЦП подключена стандартная микросхема LM335, предназначенная для измерения температуры холодного спаея термопар и внесения поправки при математиче-

ской обработке кодов АЦП. Таким образом, цикл измерения состоит из девяти шагов, заключающихся в определении выходного напряжения каждой термопары, смещения нуля усилителя и температуры холодных спаев. Собранные концентратором данные подвергаются математической обработке и в цифровом виде по последовательному интерфейсу передаются в блок индикации.

Проверка работоспособности предложенной схемы системы мониторинга огнеупорной футеровки и отладка программ используемых в ней микроконтроллеров была осуществлена на компьютерной модели (рис. 8), разработанной в программном комплексе Proteus.

В представленной модели концентратор измеряет температуру посредством использования семи датчиков в виде термопар ТС0...ТС6, устанавливаемых в различных точках на границе слоев подины и основания тигля. Каждая термопара подключается к коммутатору U1, который через усилитель K1 передает данные о текущих значениях термо-ЭДС на микроконтроллер U2. При этом восьмиканальный коммутатор U1 поочередно подключает термопары к усилителю в соответствии с входным кодом (А, В, С) [14], задаваемым микроконтроллером U2.

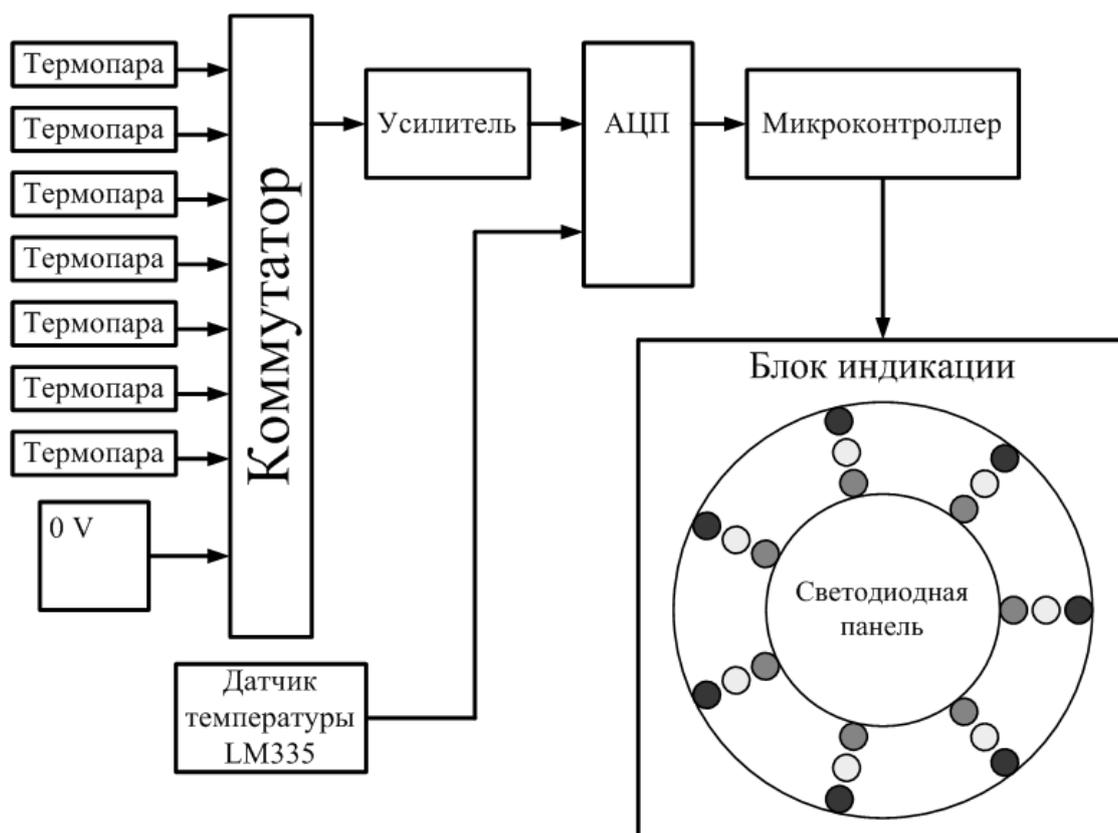


Рис. 7. Схема монитора огнеупорной футеровки на основе восьмиканального коммутатора

В соответствии с заданными характеристиками термопар микроконтроллер U2 переводит коды АЦП в численные значения температуры. Температура холодного спая определяется при помощи микросхемы D24 LM335, информация с которой передается в микроконтроллер U2, определяющий поправку и вносящий корректировку в результате измерения. Сумматор S1 позволяет вводить смещение в сигнал термопар, что дает возможности учета смещения нуля усилителя, а также, при необходимости, измерения температуры ниже температуры холодного спая.

Измеренные в контрольных точках футеровки температуры по последовательному интерфейсу в соответствии со стандартом RS232 передаются в блок индикации на вход микроконтроллера U3, который принимает данные и сравнивает их с запрограммированными в памяти значениями уставок. Обработанная микроконтроллером U3 информация поступает на светодиодную панель, а также в блок управления источника питания индукцион-

ной печи. При исходном состоянии футеровки основания тигля реле RL1 обеспечивает подключение печи к источнику питания, о чем свидетельствует свечение светодиода D1. При этом сигнальные светодиоды D3...D23 находятся в погашенном состоянии. Превышение температурой граничных отметок в какой-либо контрольной точке приводит к зажиганию светодиодов соответствующей группы. Так, например, свечение одного или нескольких зеленых светодиодов D3...D9 указывает на начальный уровень износа футеровки, находящийся в пределах от 5 до 10 %. Зажигание желтых светодиодов D10...D16 указывает на степень разрушения от 10 до 20 %, красных светодиодов D17...D23 – от 20 до 25 %. Подобная система сигнализации позволяет предупредить о начале разрушения футеровки и указать ориентировочно его местоположение, что дает возможность своевременного проведения ремонтных работ и, как следствие, продления срока службы тигля.

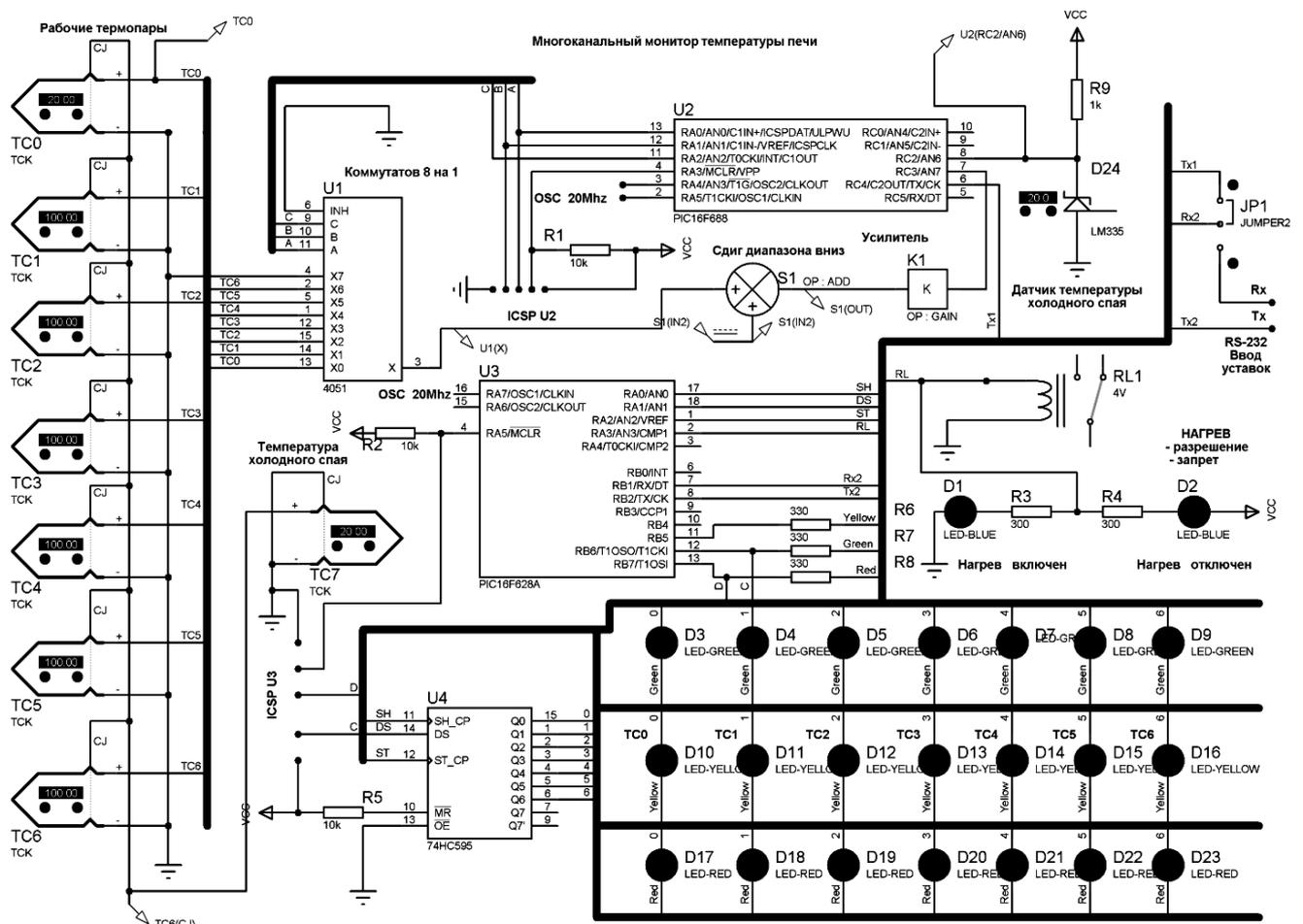


Рис. 8. Многоканальный монитор температуры футеровки печи

В то же время при отсутствии каких-либо действий со стороны обслуживающего персонала по ремонту футеровки и дальнейшей эксплуатации печи блок индикации через реле RL1 дает команду на прекращение нагрева путем отключения оборудования от источника питания при достижении критического уровня износа, равного 30 %. В этом случае миганием выделяется столбец светодиодов, связанных с термопарой, по сигналу которой прошла команда на прекращение нагрева. Необходимо отметить, что значения уставок могут быть изменены при помощи внутрисхемного программатора или по последовательному интерфейсу, посредством соединения микроконтроллера U3 с компьютером.

**Выводы.** Таким образом, осуществление непрерывного контроля уровня температурного поля в подине индукционной плавильной печи является перспективным методом определения остаточной толщины основания тигля, позволяющим продлить срок его службы и предотвратить возникновение аварийных ситуаций. При этом разработанная на основе указанного принципа компьютерная модель многоканального монитора температуры огнеупорной футеровки показала эффективность предложенной микропроцессорной схемы, которая может быть использована при практической реализации устройства.

#### Список литературы

1. **Теоретические** основы и аспекты электротехнологий. Физические принципы и реализация. Интенсивный курс. Основы I. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 359 с.
2. **Кукарцев В.А.** Выплавка чугуна и стали в индукционных тигельных печах промышленной частоты // *Сталь*. – 2016. – № 5. – С. 26–28.
3. **Фомин Н.И., Затуловский Л.М.** Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М.: Металлургия, 1979. – 247 с.
4. **Сидоров А.В.** Технико-экономическое обоснование эффективности плавки металла индукционным методом // *Вестник Самарского государственного технического университета*. – 2006. – № 41. – С. 165–168.
5. **Лузгин В.И., Петров А.Ю.** Современные технологии переработки лома черных и цветных металлов // *Металлург*. – 2008. – № 4. – С. 39–43.
6. **Кувалдин А.Б., Погребиский М.Я., Федин М.А.** Особенности расчета и управления индукционными плавильными тигельными печами и миксерами // *Сборник докладов*

научно-технического семинара «Электротехнология в первом десятилетии XXI века». – М.: Изд. дом МЭИ, 2013. – С. 227–241.

7. **Оптимизация** и управление электротехнологическими системами. Интенсивный курс. Специализация III. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 266 с.

8. **Федин М.А.** Возможности управления плавкой в индукционных тигельных печах // *Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике*. – 2015. – Т. 1. – С. 290–296.

9. **Костюкова А.П.** Информационное обеспечение мониторинга процесса плавки в индукционных тигельных печах // *Современные наукоемкие технологии*. – 2018. – № 6. – С. 96–100.

10. **Кукарцев В.А., Трунова А.И., Кукарцев А.В.** Термический анализ кварцита, используемого для футеровки индукционной тигельной печи промышленной частоты // *Новые огнеупоры*. – 2014. – № 5. – С. 33–35.

11. **Зинченко Ю.А.** Оптимизация состава футеровки плавильных печей // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2009. – № 3(42). – С. 481–491.

12. **Практ В.А., Дмитриевский В.А., Сарапулов Ф.Н.** Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электротехнических установках. – М.: Изд-во «Спутник+», 2011. – 158 с.

13. **Сойфер В.М.** Выплавка стали в кислых электропечах. – М.: Машиностроение, 2009. – 480 с.

14. **Шило В.Л.** Популярныe цифровые микросхемы: справочник. – 2-е изд., исправленное. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.

#### References

1. *Teoreticheskie osnovy i aspekty elektrotekhnologii. Fizicheskie printsipy i realizatsiya. Intensivnyy kurs. Osnovy I* [Theoretical foundations and aspects of electrical technology. Physical principles and realization. Intensive course. Fundamentals I]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo SPbGETU «LETI», 2013. 359 p.
2. Kukartsev, V.A. Vyplavka chuguna i stali v induktsionnykh tigel'nykh pechakh promyshlennoy chastoty [Smelting of iron and steel in induction crucible furnaces of industrial frequency]. *Stal'*, 2016, no. 5, pp. 26–28.
3. Fomin, N.I., Zatulovskiy, L.M. *Elektricheskie pechi i ustanovki induktsionnogo nagreva* [Electric furnaces and induction heating installations]. Moscow: Metallurgiya, 1979. 247 p.
4. Sidorov, A.V. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie effektivnosti plavki metalla induktsionnym metodom [Feasibility study on the efficiency of metal melting by induction method]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, no. 41, pp. 165–168.

5. Luzgin, V.I., Petrov, A.Yu. *Sovremennye tekhnologii pererabotki loma chernykh i tsvetnykh metallov* [Modern technologies of processing ferrous and non-ferrous metals]. *Metallurg*, 2008, no. 4, pp. 39–43.

6. Kuvaldin, A.B., Pogrebisskiy, M.Ya., Fedin, M.A. *Osobennosti rascheta i upravleniya induktsionnymi plavil'nymi tigel'nymi pechami i mikserami* [Calculation and control of induction melting crucible furnaces and mixers]. *Sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskogo seminar «Elektrotekhnologiya v pervom desyatiletii XXI veka»* [Collection of papers of the scientific and technical seminar «Electrotechnology in the first decade of the XXI century»]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2013, pp. 227–241.

7. *Optimizatsiya i upravlenie elektrotekhnologicheskimi sistemami. Intensivnyy kurs. Spetsializatsiya III* [Optimization and operation of electrical technology systems. Intensive course. Specialization III]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo SPbGETU «LETI», 2013. 266 p.

8. Fedin, M.A. *Vozmozhnosti upravleniya plavkoy v induktsionnykh tigel'nykh pechakh* [Smelting control capabilities in induction crucible furnaces]. *Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotekhnike*, 2015, vol. 1, pp. 290–296.

9. Kostyukova, A.P. *Informatsionnoe obespechenie monitoringa protsessa plavki v*

*induktsionnykh tigel'nykh pechakh* [Information support for monitoring the melting process in induction crucible furnaces]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2018, no. 6, pp. 96–100.

10. Kukartsev, V.A., Trunova, A.I., Kukartsev, A.V. *Termicheskiy analiz kvartsita, ispol'zuemogo dlya futerovki induktsionnoy tigel'noy pechi promyshlennoy chastoty* [Thermal analysis of quartzite used for industrial frequency crucible furnace lining]. *Novye ognepury*, 2014, no. 5, pp. 33–35.

11. Zinchenko, Yu.A. *Optimizatsiya sostava futerovki plavil'nykh pechey* [Optimization of the composition of the melting furnaces lining]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, no. 3(42), pp. 481–491.

12. Prakht, V.A., Dmitrievskiy, V.A., Sarapulov, F.N. *Modelirovanie teplovykh i elektromagnitnykh protsessov v elektrotekhnicheskikh ustanovkakh* [Modeling of thermal and electromagnetic processes in electrical installations]. Moscow: Izdatel'stvo «Sputnik+», 2011. 158 p.

13. Soyfer, V.M. *Vyplavka stali v kislykh elektropetchakh* [Steel smelting in acid electric furnaces]. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 480 p.

14. Shilo, V.L. *Populyarnye tsifrovye mikroskhemy* [Popular digital circuits]. Moscow: Radio i svyaz', 1989. 352 p.

---

*Долгих Иван Юрьевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, e-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru

*Dolgikh Ivan Yuryevich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Electrotechnologies, e-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru

*Марков Михаил Геннадьевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, e-mail: mark380@yandex.ru

*Markov Mikhail Gennadyevich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Electrotechnologies, e-mail: mark380@yandex.ru