

# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ С НАГРЕВАТЕЛЯМИ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Митяков Ф.Е.<sup>1</sup>, Горячих Е.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», Москва

**Аннотация** — Проводится сравнение регуляторов температуры печей сопротивления с нагревателями из тугоплавких металлов. Разработана модель «плавного пуска» печи с дополнительной обратной связью по току в канале обратной связи по температуре. Описываются особенности моделирования трансформатора с переключением ступеней напряжения. Показаны преимущества использования регулятора температуры с «токовой отсечкой».

**Ключевые слова** — высокотемпературная вакуумная печь сопротивления, тугоплавкие металлы, токовая отсечка, переключение ступеней напряжения.

## ВВЕДЕНИЕ

В электрических печах сопротивления (ЭПС) преобразование электрической энергии в тепловую осуществляется в нагревательных элементах, работающих в очень тяжелых температурных условиях, зачастую при предельно-допустимых для материала температурах. В связи с этим срок службы нагревательных элементов электропечи значительно меньше, чем у остальных механизмов и конструктивных узлов установки [1].

Нагреватели, работающие в окислительной атмосфере, выполняются из безникельвых и никельсодержащих сплавов, а также карбида кремния, хромита лантана и дисилицида молибдена. В высокотемпературных вакуумных печах сопротивления (ВПС) используются либо тугоплавкие металлы (молибден, вольфрам, тантал, ниобий и сплавы на их основе), либо материалы на основе углерода (графит, углеродистые композиционные материалы). В высокотемпературных вакуумных печах с рабочей температурой 2500÷2700 °С используются взаимные сплавы тугоплавких карбидов: ниобия, циркония, тантала, гафния.

Основным параметром материала нагревателя, влияющим на разработку системы управления ЭПС любого типа, является зависимость удельного электрического сопротивления от температуры. Тугоплавкие металлы, а также дисилицид молибдена, исследуемые в данной работе, обладают характерной особенностью – высокое значение температурного коэффициента электрического сопротивления (рис.2). Это приводит к тому, что электросопротивление нагревателя, выполненного из тугоплавких металлов, при нагреве и охлаждении изменяется в 10÷15 раз, а, следовательно, во столько же раз при питании от неизменного напряжения изменяется и ток,

протекающий по нагревателю. Такой бросок тока негативно сказывается на качестве нагревательного элемента, а также значительно сокращает срок его службы. Поэтому на практике используют различные способы снижения тока, протекающего по нагревателям, при изменении их температуры [2,3].

## ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ СТУПЕНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Классический способ питания печей сопротивления с нагревателями из тугоплавких металлов (а также дисилицида молибдена) основан на использовании многоступенчатого понижающего трансформатора с регулированием напряжения в широком диапазоне. Это необходимо для включения печи на пониженном напряжении и постепенного его увеличения по мере роста температуры и, как следствие, сопротивления нагревателя. Напряжение на нагреватель печи ВПС подается от сети 380/220 В через автоматический выключатель *QF* и силовой блок, включающий в себя тиристорный регулятор напряжения *ТРН* и электропечной понижающий трансформатор *ТВ* с переключением ступеней напряжения *ПСН* (рис.1).

Недостатки такого способа управления ВПС заключаются в следующем: выбор понижающего трансформатора для питания ВПС такого класса особенно большой мощности связан зачастую с трудностями, определяемыми отсутствием трансформаторов с достаточным количеством ступеней напряжения, необходимых при пуске печи.

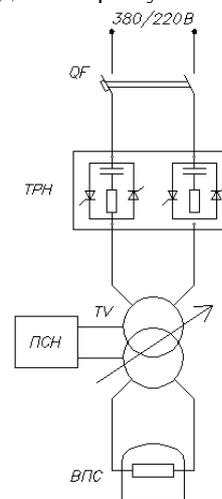


Рис. 1. Силовая схема электропитания ВПС с переключением ступеней напряжения трансформатора

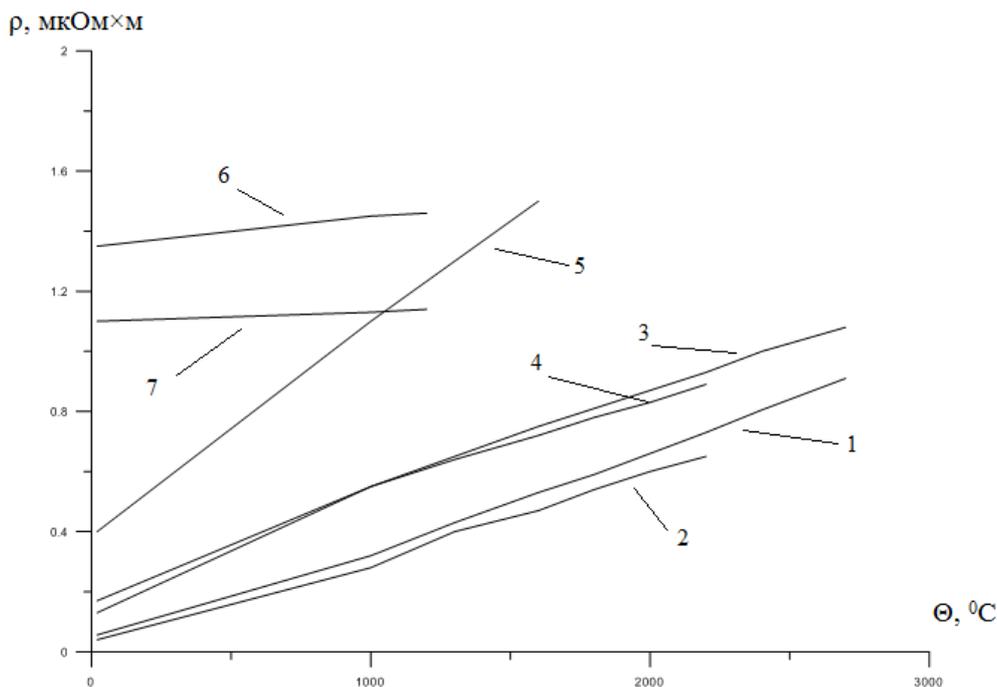


Рис. 2. Зависимость удельного электрического сопротивления материалов от температуры: 1 – вольфрам; 2 – молибден; 3 – тантал; 4 – ниобий; 5 – дисилицид молибдена; 6 – X23Ю5Т; 7 – X20Н80.

Несмотря на вышеуказанные недостатки системы управления с переключением ступеней напряжения трансформатора нашли широкое применение для ряда технологических процессов, которые реализуются в вакуумных печах сопротивления с экранной теплоизоляцией [4,5]. Это обусловлено тем, что такой способ регулирования напряжения не сопровождается искажениями напряжения и тока. Однако, исследования динамических характеристик такой системы электропитания и управления не проводились, в связи с тем, что современные методы исследования, позволяющие решать нелинейные дифференциальные уравнения, появились относительно недавно. При разработке модели систем управления такого типа необходимо уделить внимание вопросам моделирования переключения ступеней напряжения трансформатора.

В [1] была разработана модель регулятора температуры ВПС, учитывающая особенности переключения ступеней напряжения трансформатора. Структурная схема модели трансформатора (рис.3) включает в себя: релейный элемент, интегратор, зону ограничения и элемент квантования.

Система управления трансформатором выполнена таким образом, что переключение трансформатора на одну (или более) ступень осуществляется включением двигателя перемещения щетки на время, необходимое для перемещения щетки на одну (или более) ступень.

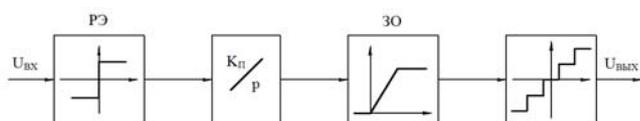


Рис. 3. Структурная схема трансформатора с переключением ступеней напряжения.

На модели это можно представить путем включения на вход трансформатора 2-х позиционного релейного элемента. Коэффициент передачи трансформатора  $K_{П}$  можно определить, исходя из времени переключения с одной ступеней на другую. Время переключения  $t_{П}$  стандартных трансформаторов составляет от 4-х до 8-ми секунд. При подаче единичного сигнала управления выходное напряжение одной ступени  $\Delta U = K_{П} \cdot t_{П}$ . Следовательно, коэффициент передачи определяется как  $K_{П} = \Delta U / t_{П}$  [В/с]. При построении модели регулируемого трансформатора в составе системы регулирования температуры следует иметь в виду, что выходное напряжение (действующее значение переменного напряжения) всегда положительно, т.е. на выходе трансформатора  $U_{ВЫХ} > 0$ . Кроме того, максимальное значение выходного напряжения также ограничено номинальным значением. Здесь минимальное и максимальное значения напряжения трансформатора вводятся в звене ограничения ЗО. Запасыванием, обусловленным временем переключения реле, управляющего двигателем перемещения щетки трансформатора, составляющем приблизительно 0,02 с, пренебрегаем. Для исключения возможности возникновения автоколебаний в зоне малых рассогласований сигнала в схему модели введен 3-х позиционный релейный элемент.

Данная система нелинейная. Аналитическое исследование не представляется возможным. Поэтому решение нелинейных дифференциальных уравнений проводилось с использованием методов структурного моделирования с применением пакета прикладных программ Simulink Matlab.

Модель, разработанная в системе Simulink Matlab [1], имеет ряд особенностей (рис.4):

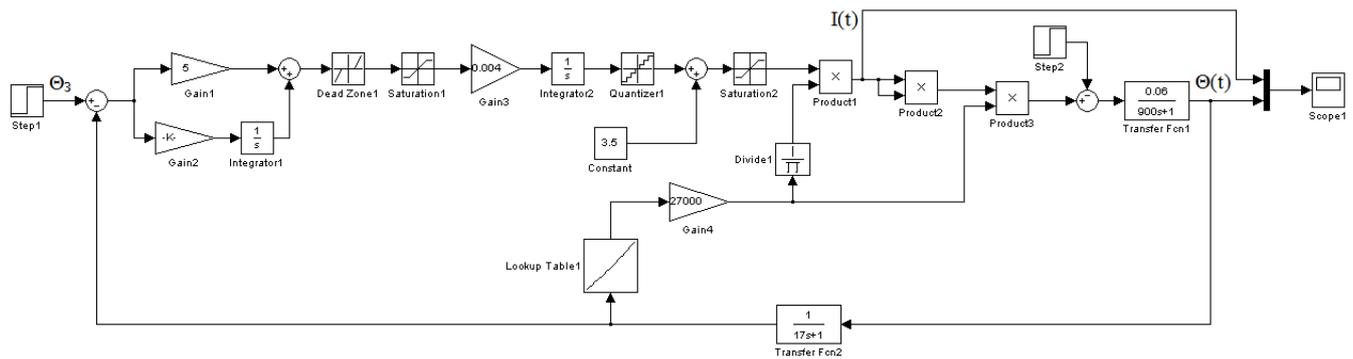


Рис. 4. Модель системы управления ВПС с переключением ступеней напряжения трансформатора.

- 3-х позиционный релейный элемент выполняется последовательным соединением блоков *Dead Zone* (зона нечувствительности) и *Saturation* (блок ограничения) и для исключения возможностей автоколебаний необходима дополнительная настройка параметров зоны нечувствительности;

- переключение ступеней напряжения трансформатора реализуется как сумма выходных сигналов от блоков *Constant* (константа) и *Quantizer* (блок квантования), в первом блоке задается значение первой ступени напряжения, во втором – шаг переключения ступеней напряжения;

- для отлаженной работы системы необходима точная настройка интегральной составляющей трансформатора *Gain3*, в связи с тем, что при отклонении даже на один порядок, программа Simulink Matlab выдает ошибку;

- учитывая особенность нагревателей из тугоплавких металлов, модель включает в себя блок *Lookup Table*, который позволяет задавать в систему сопротивление нагревателя в зависимости от действующей температуры в печи;

- в типовых моделях ЭПС на вход печи поступает сигнал мощности. Поскольку в данной работе исследуется влияние переключения ступеней напряжения трансформатора на броски тока, протекающего по нагревателям, то в схеме модели введены дополнительные блоки умножения *Product*, выделяющие сигнал тока, согласно выражению  $P = I^2 \times R(\theta)$ .

Данная модель позволяет сравнивать качество переходных процессов в печи, при применении различных трансформаторов, и в зависимости от исходных данных и конкретного типа печи подобрать оптимальный трансформатор, увеличивая энергетическую эффективность установки. Система управления с переключением ступеней напряжения трансформатора позволяет сократить бросок тока по отношению к номинальному току нагревателя с 9кратного (без применения ограничения тока или переключения ступеней трансформатора) до 2-кратного, что позволяет значительно продлить срок службы нагревательных элементов установки.

### СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ТОКУ

Другим способом снижения броска тока в системах управления нагревателями из тугоплавких металлов является применение токовой отсечки, ограничивающий ток на нагревателях в процессе разогрева печи.

В настоящее время промышленный регулятор температуры печи сопротивления [6,7] выполняется в виде набора следующих функциональных элементов: задающего устройства, служащего для ручного или автоматического ввода заданного значения регулируемой температуры; вычислительного устройства, выполняющего функции сравнения действительного и заданного значения температуры и вырабатывающего требуемый закон регулирования; исполнительного элемента (регулятора мощности), изменяющего вводимую в печь мощность; датчика температуры печи.

Как правило, вычислительное устройство выполняется в виде специализированного программируемого контроллера (регулятора температуры), в котором с помощью дисплея вводится вручную задание температуры и значение коэффициентов передачи пропорциональной (П), интегральной (И) и дифференциальной (Д) составляющих ПИД-закона регулирования. В ряде специализированных исполнительных элементов – тиристорных регуляторов переменного напряжения, вводят нелинейную отрицательную обратную связь по току (токовую отсечку), ограничивающую ток нагрузки допустимыми для тиристорных значениями.

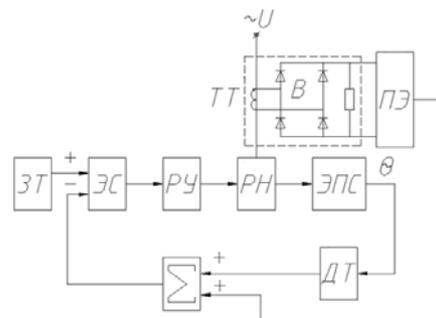


Рис. 5. Функциональная схема разработанного регулятора температуры электропечи сопротивления.

В большинстве исполнений тиристорных регуляторов мощности токовую отсечку не применяют. Более того, введение токовой отсечки возможно только при использовании фазоимпульсного способа управления тиристорами регулятора мощности, в то время как для печей сопротивления применяют импульсное (релейное) управление тиристорами, позволяющее уменьшить стоимость при сохранении качества и точности регулирования. Однако, как показали исследования, в релейных регуляторах температуры вводить токовую отсечку нельзя.

Отсутствие контроля тока в стандартном регуляторе температуры приводит к увеличению установленной мощности тиристоров и регулятора. Следует также отметить, что резкие колебания тока уменьшают срок службы нагревателей.

Таким образом, отсутствие в стандартных программируемых регуляторах температуры внешних входов для введения отрицательной обратной связи по току ограничивает их применение для высокотемпературных печей, требующих контроля тока нагревателей, при включении «холодной» печи.

Для расширения возможностей стандартных программируемых регуляторов температуры предлагается вводить обратную связь по току в канал обратной связи температуры [3].

На рис.5. приведена функциональная схема модернизированного регулятора температуры. Данное устройство отличается от промышленного регулятора, описанного выше, тем, что между источником питания и силовым входом регулятора напряжения  $PН$  установлен датчик тока  $ТТ$ . Датчик тока может быть выполнен в виде трансформаторов тока вторичными обмотками, подключенными к выпрямителю, связанному своим выходом с входом порогового элемента.

Сигнал тока, снимаемый датчиком тока, через пороговый элемент  $ПЭ$  подается в сумматор  $\Sigma$  совместно с сигналом температуры, снимаемым датчиком температуры  $ДТ$ . Суммированный сигнал тока и температуры подается на вычислительное устройство ЭС.

По данному техническому решению получен патент на полезную модель № 98602 [8].

В [3] проводилось сравнение характеристик регуляторов температуры с токовыми отсечками. Сравнительное исследование регуляторов температуры с ограничением тока проводилось на разработанной модели (рис.6), реализованной в пакете прикладных программ Simulink Matlab, путем вывода на экран виртуального осциллографа переходных функций: тока  $I(t)$  и температуры  $\theta(t)$ .

По результатам сравнения были получены следующие результаты [3]. Можно было ожидать, что обратная связь по внутреннему контуру тока традиционного регулятора температуры обладает лучшими характеристиками, однако:

- ограничение тока приводит к снижению скорости изменения температуры в сравнении с регулятором без ограничения тока;
- обе схемы обеспечивают требуемое качество переходного процесса;
- переходные функции тока и температуры, исследуемых регуляторов, схожи между собой;
- перерегулирование и точность переходной функции температуры лучше, при использовании предлагаемого регулятора;
- бросок тока на нагревателях (при одинаковом значении токовой отсечки – 6000 А) меньше в предлагаемом регуляторе, что положительно влияет на срок службы нагревателя.

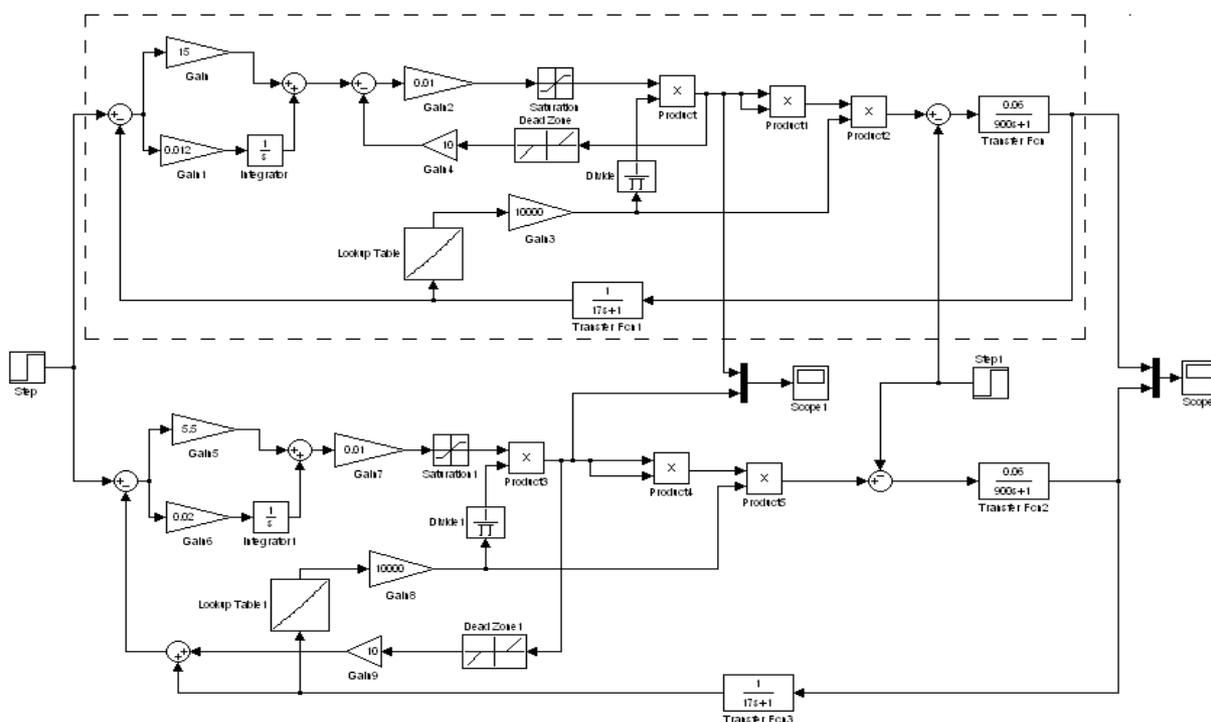


Рис. 6. Модели регуляторов температуры, реализованные в среде Simulink Matlab: 1 – с токовой отсечкой в регуляторе; 2 – с дополнительной обратной связью по току.

## СРАВНЕНИЕ ТОКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Для наглядного сравнения способов обеспечения «плавного пуска» нагревателей с высоким значением коэффициента электрического сопротивления, представим характеристики тока на общем рисунке.

Как показывает анализ рис.7:

- все способы организации питания нагревателей позволяют обеспечить плавный пуск печи;
- для ряда технологических процессов, когда не требуется ограничение скорости нагрева, использование регуляторов с «токовой отсечкой» позволяет регулировать (увеличивать) скорость нагрева в сравнении с системой управления с переключением ступеней напряжения трансформатора;
- применение регулятора с дополнительным каналом по току позволяет снизить бросок тока на нагревателях: на 30% в сравнении с «токовой отсечкой» во внутреннем контуре регулятора; на 70% – с переключением ступеней напряжения трансформатора;
- кроме того, система управления с дополнительным каналом по току более проста и удобна в настройке.

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ КАНАЛОМ ПО ТОКУ

Регулятор температуры с применением дополнительного канала по току в канале обратной связи по температуре обладает наилучшими характеристиками (рис.6). В связи с этим, в [3] дополнительно были проведены исследования с целью определения

зависимости времени выхода на номинальный режим нагревателей, а также настройки параметров ПИ-регулятора, при различных значениях отношения «токовой отсечки» к номинальному току.

На рис.8. представлена зависимость быстродействия выхода на режим нагревателей печи от отношения «токовой отсечки» к номинальному току, при использовании разработанного регулятора температуры. Как следует из зависимости (рис.8.), увеличение токовой отсечки выше  $3 \times I_{НОМ}$  не имеет особого смысла в связи с минимальным увеличением скорости выхода на режим нагревателей. Поэтому можно рекомендовать, при настройке системы с использованием предлагаемого регулятора температуры, устанавливать значение «токовой отсечки» в диапазоне от 2 до  $3 I_{НОМ}$ . Вопрос влияния величины броска тока на срок службы нагревателей требует специального рассмотрения и в рамках данной работы рассмотрен не был.

При определении настройки параметров ПИ-регулятора было установлено:

- при отношении  $I_{ОТС}/I_{НОМ} \leq 2$ , значение пропорциональной составляющей, при настройке ПИ-регулятора, является постоянным;
- при отношении  $I_{ОТС}/I_{НОМ} \geq 3$ , значение пропорциональной составляющей плавно уменьшается.

Наиболее сложной задачей является определение и настройка пропорциональной составляющей при значениях «токовой отсечки», как раз в рекомендуемом нами диапазоне  $2 < I_{ОТС}/I_{НОМ} < 3$ .

Интегральная составляющая ПИ-регулятора, при изменении токовой отсечки, практически не меняется.

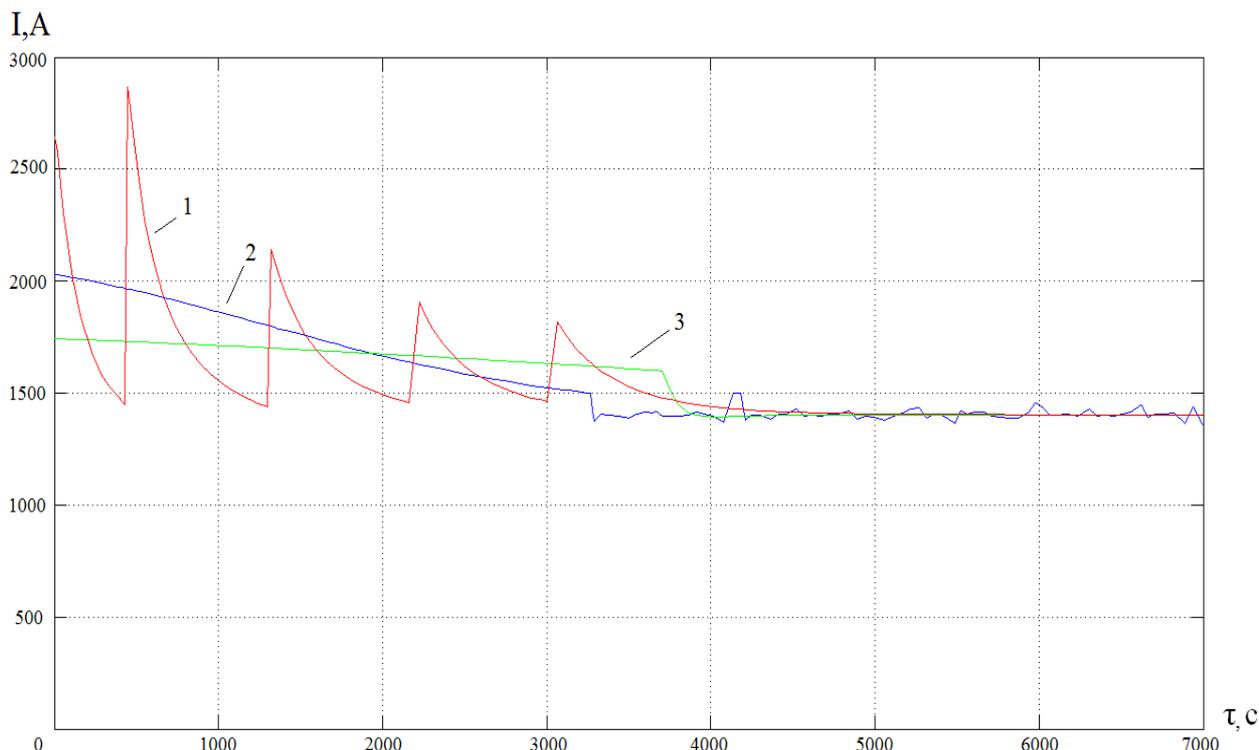


Рис. 7. Зависимости тока на нагревателях от времени: 1 – с переключением ступеней напряжения; 2 – с внутренним контуром тока; 3 – с дополнительной обратной связью.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

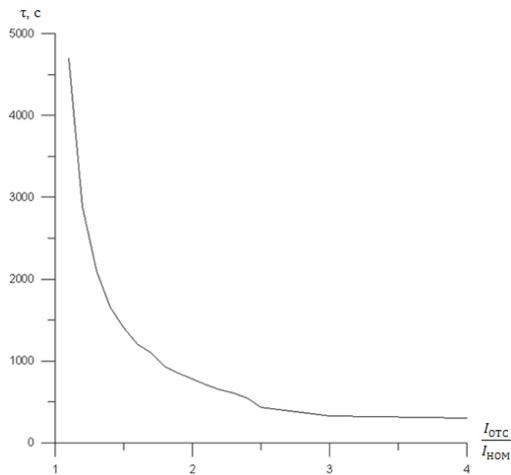


Рис. 8. Зависимость быстродействия нагревателя от отношения тока «отсечки» к номинальному току.

1. Митяков Ф.Е., Горячих Е.В. Исследование влияния переключения ступеней напряжения трансформатора на работу регуляторов температуры в высокотемпературных вакуумных печах сопротивления // Электротехника, 2013, №7, 33-37.
2. Материалы для электрических печей сопротивления: учебное пособие / М.Я. Погребиский, Н.Г. Батов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 92 с.
3. Рубцов В.П., Митяков Ф.Е., Горячих Е.В., Кручинин А.М. Влияние ограничения тока нагревателей на работу регуляторов температуры в высокотемпературных вакуумных печах сопротивления // Вестник МЭИ, 2012, №2, с.80-84.
4. Лейканд М.С. Вакуумные электрические печи (сопротивления и индукционные). М., «Энергия», 1968. – 328 с.
5. В.М. Фомин, А.П. Слободской. Вакуумные электрические печи сопротивления с экранной теплоизоляцией, М., «Энергия», 1970. – 96 с.
6. Электрические промышленные печи. Учебник для вузов. В 2-х ч. Ч. 1. А. Д. Свенчанский. Электрические печи сопротивления. Изд. 2-е, перераб. М., «Энергия», 1975. – 384 с.
7. Электрооборудование и автоматика электротермических установок: /Справочник/ Альтгаузен А.П. и др.; Под ред. А.П. Альтгаузена и др. – М.: Энергия, 1978.
8. Пат. на полезную модель № 98602 «Регулятор температуры электропечи сопротивления» / В.П. Рубцов, Е.В. Горячих, Ф.Е. Митяков. 2010. Бюл. №29.