

В. А. Иванушкин, Д. В. Исаков,
Нижнетагильский технологический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (г. Нижний Тагил, Россия)

Ф. Н. Сарапулов,
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург, Россия)

А. А. Рабек,
ОАО «Уральский научно-технологический комплекс» (г. Нижний Тагил, Россия)

ФОРМИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РЕГУЛЯТОРОВ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ

При решении задач оптимизации потребления электрической энергии энергоемкими объектами значительные возможности заключаются в создании алгоритмов управления адаптированных к различным интервалам периодов технологического процесса. Значительная роль в реализации таких энергоэффективных алгоритмов [1] в регуляторах мощности дуговых сталеплавильных печей принадлежит функциональным преобразователям, осуществляющим преобразование сигналов рассогласования и выработку величины и характера управляющих воздействий на исполнительные механизмы.

В работе приводится математическое описание функционального преобразователя регулятора для одной фазы печи, разработанное исходя из того, что его статическая характеристика $\mu = \varphi(\varepsilon)$ должна удовлетворять следующим параметрам.

1. Не допускать появления непроизводительных потерь электроэнергии в исполнительном механизме регулятора при нахождении сигнала рассогласования в пределах зоны нечувствительности [2, 3].

2. Давать возможность независимой настройки вида и параметров отдельно для каждого интервала периодов плавки [4].

3. Давать возможность установки нижней границы зоны нечувствительности в период проплавления колодцев и, соответственно, верхней границы – в период подъема уровня жидкого металла до заданного значения [5].

4. Не допускать излишних перемещений электродов при кратковременных самоликвидирующихся возмущениях [6].

5. Иметь возможность формирования двух зон пропорционального регулирования и независимой настройки их параметров [4].

6. Обеспечивать реализацию режима нереверсивного регулирования в период прорезки колодцев [7].

7. Обеспечивать режим непрерывного позиционирования зоны нечувствительности после окончания стадии плавления и нахождения сигнала рассогласования в ее границах [8].

Математическое описание участков статической характеристики предлагаемого преобразователя, соответствующего указанным требованиям, приведено в таблице, обозначено следующее:

- $1(\Delta t_{31-1})$ – единичная функция, равная 0 или +1 соответственно при отсутствии или наличии сигнала на выходе таймера задержки перехода в релейный режим при положительных кратковременных самоликвидирующихся возмущениях ($\varepsilon > 0$);
- $1(\Delta t_{31-2})$ – единичная функция, равная 0 или +1 соответственно при отсутствии или наличии сигнала на выходе таймера задержки перехода в релейный режим при отрицательных кратковременных самоликвидирующихся возмущениях ($\varepsilon < 0$);

- $1(\Delta_{31})$ – единичная функция, равная 0 или +1 соответственно в режиме реверсивного или нереверсивного регулирования.

Таблица

Уравнения участков характеристики $\mu = \varphi(\varepsilon)$ функционального преобразователя

Граница участка (зона)	Уравнение участка	Условие
$a_{31} \rightarrow \varepsilon > 0$	$\mu = \mu_{31} + (\mu_{41} - \mu_{31}) * 1(\Delta t_{31-1})$ $\mu = \mu_{31} * 1(\Delta t_{31})$ $\mu = \mu_{31} + (\mu_{41} - \mu_{31}) * 1(\Delta_{31-2})$ $\mu = \mu_{31} * 1(\Delta t_{31-2})$	$\varepsilon > a_{41}$ при $d\varepsilon/dt > 0$ или $\varepsilon > a_{31}$ при $d\varepsilon/dt < 0$ $a_{31} < \varepsilon < a_{41}$ при $d\varepsilon/dt > 0$ $\varepsilon > a_{41}$ при $d\varepsilon/dt > 0$ или $\varepsilon > a_{31}$ при $d\varepsilon/dt < 0$ $a_{31} < \varepsilon < a_{41}$ при $d\varepsilon/dt > 0$
$a_{21} \leftrightarrow a_{31}$ $\varepsilon > 0$	$\mu = \mu_{21} + [(\mu_{31} - \mu_{21}) / (a_{31} - a_{21})] * (\varepsilon - a_{21})$ $\mu_{21} = \mu_{31}$	$a_{21} \leq \varepsilon < a_{31}$ $\varepsilon \geq a_{31}$
$a_{11} \leftrightarrow a_{21}$ $\varepsilon > 0$	$\mu = \mu_{11} + [(\mu_{21} - \mu_{11}) / (a_{21} - a_{11})] * (\varepsilon - a_{11})$ $\mu = \mu_{21}$	$a_{11} \leq \varepsilon < a_{21}$ $\varepsilon \geq a_{21}$
$0 \leftrightarrow a_{11}$ $\varepsilon > 0$	$\mu = 0$ $\mu = \mu_{11}$	$\varepsilon < a_{11}$ $\varepsilon \geq a_{11}$
$-a_{12} \leftrightarrow 0$ $\varepsilon < 0$	$\mu = 0$ $\mu = -\mu_{12}$	$-a_{12} < \varepsilon$ $\varepsilon \leq -a_{12}$
$-a_{12} \leftrightarrow -a_{22}$ $\varepsilon < 0$	$\mu = -\mu_{12} - [(\mu_{22} - \mu_{12}) / (a_{22} - a_{12})] * (\varepsilon - a_{12})$	$-a_{12} \geq \varepsilon > -a_{22}$
$-a_{22} \leftrightarrow -a_{32}$ $\varepsilon < 0$	$\mu = -\mu_{22} - [(\mu_{32} - \mu_{22}) / (a_{32} - a_{22})] * (\varepsilon - a_{22})$	$-a_{22} \leq \varepsilon > -a_{32}$
$\leftarrow -a_{32}$ $\varepsilon < 0$	$\mu = -\mu_{32} - (\mu_{42} - \mu_{32}) * 1(\Delta t_{32} = 1)$ $\mu = -\mu_{32} (\Delta t_{32} = 0)$	$\varepsilon < -a_{42}$ при $d\varepsilon/dt < 0$ или $\varepsilon < -a_{32}$ при $d\varepsilon/dt > 0$ $0 < \varepsilon < a_{31}$ при $d\varepsilon/dt > 0$ 0

Примечания: 1) (Δt_{31-1}) – единичная функция, равная 0 или +1 соответственно при отсутствии или наличии сигнала на выходе таймера задержки перехода в релейный режим при положительных кратковременных самоликвидирующихся возмущениях ($\varepsilon > 0$); 2) (Δt_{31-2}) – единичная функция, равная 0 или +1 соответственно при отсутствии или наличии сигнала на выходе таймера задержки перехода в релейный режим при отрицательных кратковременных самоликвидирующихся возмущениях ($\varepsilon < 0$); 3) (Δ_{31}) – единичная функция, равная 0 или +1 соответственно в режиме реверсивного или нереверсивного регулирования.

Согласно данным таблицы, что рассматриваемый функциональный преобразователь структурно можно представить в виде двух каналов I и II (соответственно на подъем и опускание электрода фазы печи), включенных параллельно согласно. Каждый из каналов, в свою очередь, содержит по четыре последовательно включенных нелинейных модуля с уставками их срабатывания ($\mu_{11}, \mu_{21}, \mu_{31}, \mu_{41}$ – на подъем электрода и соответственно, $\mu_{21}, \mu_{22}, \mu_{33}, \mu_{42}$ – на его спуск), обеспечивающими их последовательное включение и суммирование управляющих сигналов при возрастании рассогласования ε и отключение модулей в обратном порядке при его уменьшении с соответствующим снижением выходного сигнала. Сигнал рассогласования подается одновременно на входы двух каналов, при этом результирующее выходное воздействие μ на исполнительный механизм перемещения электрода определяется выражениями: $\mu = \mu_{11} + d\mu_{21} + d\mu_{31} + d\mu_{41}$ при $\varepsilon > 0$ и $\mu = -\mu_{11} - d\mu_{21} - \mu_{31}$ при $\varepsilon < 0$

(где dm – выходные сигналы второго и последующих модулей). Модульная структура канала I отработки рассогласования при положительном рассогласовании ε представлена на рис.1.

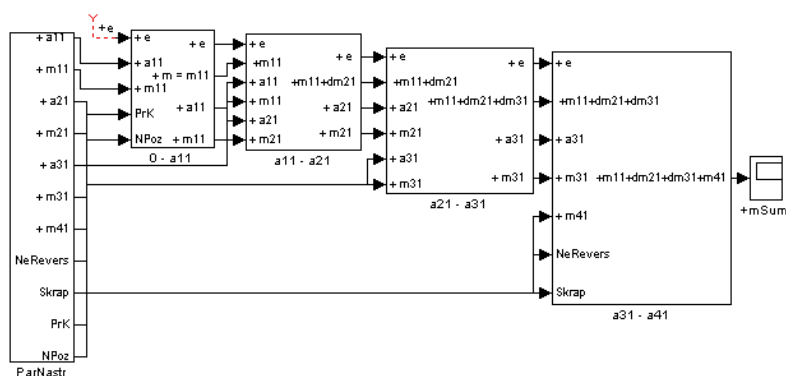


Рис.1. Модульная структура канала I

Входной модуль $0 - a_{11}$ выполнен в виде двухпозиционного звена с зоной нечувствительности без зоны неоднозначности и реализует двухпозиционный закон регулирования с выходным управляющим воздействием μ_{11} (μ_{11} – фиксированный параметр настройки) и зоной нечувствительности a_{11} . Величина параметра μ_{11} принимается исходя из необходимости исключения непроизводительных потерь электроэнергии и нагрева приводного двигателя в неподвижном состоянии, а также повышения статической точности системы регулирования. Данный модуль дополнительно содержит субблоки дискретного и непрерывного позиционирования зоны нечувствительности a_{11} и два информационных входа признака режима: PrK – проплавление колодцев и OkP (окончательный период – доплавление шихты и подогрев жидкого металла). Первый режим исключает недобор энергии, увеличивает производительность и снижает удельный расход электроэнергии, второй – снимает остаточное рассогласование и тем самым повышает точность стабилизации заданного электрического режима печи.

Выходной сигнал последующего модуля $a_{11} - a_{21}$ (первая зона релейно-пропорционального регулирования с коэффициентом усиления $K_1 = \mu_{21} - \mu_{11}/a_{21} - a_{11}$ и ограничением выходного сигнала на уровне μ_{21} при $\varepsilon \geq a_{21}$) изменяется по линейному закону не с нулевого значения, а с установкой его на пьедестал, равный μ_{11} , обеспечивающий гарантированное движение электрода с минимальной начальной скоростью. В целом данный модуль реализует релейно-пропорциональный закон регулирования с зоной насыщения.

Выходной сигнал модуля $a_{21} - a_{31}$ (вторая зона пропорционального регулирования с коэффициентом усиления $K_2 = \mu_{31} - \mu_{21}/a_{31} - a_{21} > K_1$) также изменяется по линейному закону, но установкой его на пьедестал равный $\mu_{21} > \mu_{11}$, с последующим ограничением его при $\varepsilon \geq a_{31}$ на уровне μ_{31} . Этот модуль реализует пропорциональный закон регулирования с зоной насыщения и обеспечивает отработку рассогласования с постоянной пониженной скоростью перемещения электрода при $\varepsilon \geq a_{31}$. Наличие участка релейно-пропорционального регулирования с коэффициентом усиления $K_1 < K_2$ диктуется необходимостью обеспечения устойчивого процесса отработки небольших рассогласований и исключения выхода регулируемого параметра за пределы границ зоны нечувствительности при отработке больших рассогласований.

Четвертый модуль $a_{31} - a_{41}$ содержит два субблока SB1 и SB2 и два дополнительных информационных входа (NeRever и Skrap). С помощью субблока SB1 реализуется временная задержка перехода в релейный режим при кратковременных самоликвидирующихся возмущениях (например, расплавление тонкого скрапа) с формированием управляющего сигнала на уровне μ_{41} (максимальная скорость отработки положительных сигналов рассогласования). В случае если $1(\Delta t_{31-1}) = 1$ дан-

ным субблоком реализуется двухпозиционный релейный закон регулирования с временной зоной возврата во вторую зону пропорционального регулирования $a_{21} \leftrightarrow a_{31}$. Субблок SB2 реализует режим неререверсивного регулирования в периоды зажигания дуг и прорезки колодцев. Использование этого режима приводит к существенному сокращению времени проплавления колодцев за счет повышения устойчивости процесса стабилизации электрического режима. Данный субблок реализует также двухпозиционный релейный закон регулирования с зоной возврата на крайнюю границу второй зоны пропорционального регулирования $a_{21} - a_{31}$ при условии, что $1(\Delta_{31}) = 1$.

С помощью модуля ParNastr обеспечивается выбор и задание режима (информационные выходы NeRever и Skrap), также задание параметров настройки модулей канала I. Параметрами настройки характеристики $\mu = \varphi(\varepsilon)$ $\varepsilon > 0$ являются: $a_{11} \rightarrow \mu_{11}$, $a_{21} \rightarrow \mu_{21}$, $a_{31} \rightarrow \mu_{31}$, $a_{41} \rightarrow \mu_{41}$. При этом параметры $a_{11} < a_{21} < a_{31} < a_{41}$ являются входными параметрами участков, а $\mu_{11} < \mu_{21} < \mu_{31} < \mu_{41}$ – выходными.

Структура канала II аналогична структуре канала I, отличие заключается в отсутствии в четвертом модуле II канала субблока, реализующего неререверсивное управление, а также выхода NeRevers в модуле настройки параметров ParNastr. Параметрами настройки характеристики $\mu = \varphi(\varepsilon)$ при $\varepsilon < 0$ являются: $-a_{121} \rightarrow -\mu_{12}$, $-a_{22} \rightarrow -\mu_{22}$, $-a_{32} \rightarrow -\mu_{32}$, а также $-\mu_{42}$. В этом случае параметры $-a_{12} > -a_{22} > -a_{32}$ являются входными параметрами участков, а $-\mu_{21} > -\mu_{22} > -\mu_{32} > -\mu_{42}$ – выходными, при этом $|\mu_{42}| < \mu_{41}$.

Внутренняя структура модулей каналов I и II представлена в виде структурных алгоритмических схем. Полная модель рассматриваемого преобразователя исследована в программе MATLAB с использованием библиотеки блоков SIMULINK. Практическая его реализация в настоящее время целесообразна программно на базе промышленных контроллеров, как при новом проектировании, так и при модернизации электроприводов исполнительных механизмов действующих автоматических регуляторов дуговых печей.

Список использованных источников

1. В. А. Иванушкин, Д. В. Исаков, А.С. Романкин Энергоэффективное управление электроприводами перемещения электродов трехфазных дуговых печей // Труды междунар. 15-й науч-техн. конф. “Электроприводы переменного тока”, 12-16 марта 2012 г., Екатеринбург, 2012. С. 205-206.
2. А.с. 1 424 702 СССР. Регулятор мощности дуговой электропечи / В.А. Иванушкин. – Открытия. Изобретения, 1988, № 27.
3. А.с. 701 513 СССР. Регулятор мощности дуговой электропечи / В.А. Иванушкин, С.Е. Зубарев, Ю.Г. Тимеев, В.М. Томушкин. – Открытия. Изобретения, 1978.
4. В.А. Иванушкин, Д. В. Исаков, В. Н. Кожеуров, Ф. Н. Сарапулов Структурное моделирование электротехнологических систем и механизмов // Нижнетагил. технол. ин-т (фил.) УГТУ-УПИ. - Нижний Тагил: НТИ (ф) УГТУ-УПИ, 2006.
5. Пат. 2 448 165 РФ. Регулятор мощности дуговой сталеплавильной печи / В. А. Иванушкин, Ф. Н. Сарапулов, С. Ф. Сарапулов, Д. В. Исаков, А. Ю. Терехов, Т. В. Гамова. - Открытия. Изобретения, 2012, № 11.
6. А. с. 731 615 СССР. Регулятор мощности дуговой электропечи / В. А. Иванушкин, С. Е. Зубарев, Ю. Г. Тимеев, В. М. Томушкин. – Открытия. Изобретения, 1980, № 16.
7. А. с. 1365375 СССР. Регулятор мощности дуговой электропечи / В.А. Иванушкин. - Открытия. Изобретения, 1998, № 1.
8. Пат. 2 334 926 РФ. Регулятор положения электрода дуговой сталеплавильной печи / В. А. Иванушкин, Ф. Н. Сарапулов, Д. В. Исаков, В. Н. Кожеуров. – Открытия. Изобретения, 2008, № 27.