



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ДУГ МОЩНОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ШАХТНОГО ТИПА

В рамках данной работы, на основании экспериментально полученных сигналов мгновенных значений фазного напряжения и тока электрической дуги в трёхфазной дуговой сталеплавильной печи (ДСП) шахтного типа ШП-125, с помощью разработанной математической модели были рассчитаны сигналы мгновенных значений напряжений электрических дуг на начальной стадии плавления шихты с использованием заранее известных параметров схемы замещения электрического контура. Полученные данные позволили произвести сравнительный анализ изменения гармонического состава сигналов тока и напряжения электрической дуги, который включал в себя анализ относительных действующих значений суммарных, чётных и нечётных гармоник. В результате было показано, что гармонический состав сигнала напряжения электрической дуги в меньшей мере подвержен влиянию возмущающих воздействий в виде мгновенного изменения длины дуги, а также возникающих несимметричных режимов по сравнению с гармоническим составом тока дуги. Данный вывод говорит о том, что анализ гармонического состава сигнала напряжения дуги может эффективно применяться в системах автоматического управления электрическим режимом ДСП для решения задач диагностики стадии плавления шихты на начальных этапах плавки, обеспечивая повышение энергетической эффективности сталеплавильного комплекса. При этом в середине и конце плавки, когда влияние возмущающих воздействий снижено, методики диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам токов и напряжений дуг эффективны практически в равной мере, вследствие чего ресурсоёмкий расчёт мгновенных значений напряжений дуг становится нецелесообразным.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрическая дуга, преобразование Фурье, анализ гармонического состава, диагностика стадии плавки.

ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько десятилетий в металлургической промышленности при производстве жидкой стали широкое распространение получили дуговые сталеплавильные печи (ДСП) и установки ковш-печь (УКП). Несмотря на ряд преимуществ, которые предоставляет производителю технология выплавки стали в ДСП с последующей внепечной обработкой расплава в УКП, существует ряд технико-экономических издержек, связанных с высоким энергопотреблением ДСП-УКП как электротехнических комплексов. Вследствие устойчивой тенденции роста объёма выплавки и удельной мощности печного трансформатора (для современных ДСП – около 0,75–1 МВт/т) особую актуальность приобрела задача повышения эффективности работы печи путём выявления существующих энергетических резервов.

Одним из путей решения данной задачи является разработка новых методик диагностики стадии плавления шихты, что позволит адекватно оценивать технологические процессы, протекающие в ванне печи в режиме реального времени, что, в свою очередь, обеспечит возможность выбора наиболее оптимального электрического режима работы установки, направленного на обеспечение максимальной производительности при оптимальных энергозатратах.

Отметим, что подавляющее большинство систем управления электрическим режимом ДСП и УКП, таких как Arcos, Simelt (Primetals Technologies, Великобритания), Hireg (Danieli, Италия), E.M.P.E.R.E (Amec

Spie, Франция) и др., в качестве критерия перехода с одной стадии плавления шихты на другую используют показатель удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$ [кВт·ч/т]. Тем не менее величины критических значений $W_{уд,кр.н}$ [кВт·ч/т], при достижении которых определённый технологический этап плавления шихты считается пройденным, определяются по средним показателям для всех плавов и не учитывают индивидуальных особенностей каждой плавки в отдельности.

В рамках данной статьи выполняется экспериментальное исследование гармонического состава токов и напряжений электрических дуг, оценивается характер их изменения, а также делается вывод о возможности повышения точности диагностики стадии плавки с использованием информации о гармоническом составе напряжений дуг. В качестве объекта исследования выступает шахтная дуговая сталеплавильная печь ШП-125 с технологией предварительного подогрева шихты отводимыми газами.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

В современных исследованиях одним из наиболее практически применимых математических представлений электрической дуги является дифференциальное уравнение мгновенной проводимости электрической дуги (уравнение Касси) [1]:

$$\theta_d \frac{dg_d(t)}{dt} = \left(\frac{u_d^2(t)}{E_d^2} - 1 \right) g_d(t), \quad (1)$$

где θ_d – тепловая постоянная времени дуги; $g_d(t)$ – мгновенное значение проводимости дуги; $u_d(t)$ – мгновенное значение напряжения дуги; E_d – ЭДС дуги.

В свою очередь, ЭДС дуги рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$E_d = \alpha + \beta L_d, \quad (2)$$

где α – падение напряжения в приэлектродных областях (принимается равным 40 В); β – градиент напряжения дугового столба (принимается равным 1 В/мм); L_d – длина электрической дуги в миллиметрах.

В рамках исследования [2] обосновано, что θ_d является параметром, который напрямую связан со стадией плавления шихты. Так, на начальной стадии плавки величина θ_d находится в диапазоне 800-1000 мкс, в середине плавки – 1000-2500 мкс, а на конечной стадии, после образования расплава и экранирования дуг вспененным шлаком – 2500-3500 мкс. Очевидно, что величина θ_d не может быть измерена напрямую. О её величине можно судить исходя из гармонического состава сигналов тока $i_d(t)$ и напряжения электрической дуги $u_d(t)$. Так, чем больше величина θ_d – тем ближе форма кривых $i_d(t)$ и $u_d(t)$ к синусоидальной, и, соответственно, тем меньше доля высших гармонических составляющих в их составе, определяемая таким параметром, как суммарный коэффициент гармонических искажений тока и напряжения дуги K_U , K_I (THD_U , THD_I):

$$K_{Id} = \frac{\sqrt{I_{d(0)}^2 + \sum_{i=2}^n I_{d(n)}^2}}{I_{d(1)}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где K_{Id} – суммарный коэффициент гармонических искажений сигнала тока дуги; $I_{d(n)}$ – действующее значение n -й гармоники в составе сигнала тока дуги; $I_{d(1)}$ – действующее значение первой гармоники в составе сигнала тока дуги;

$$K_{Ud} = \frac{\sqrt{U_{d(0)}^2 + \sum_{i=2}^n U_{d(n)}^2}}{U_{d(1)}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где K_{Ud} – суммарный коэффициент гармонических искажений сигнала напряжения дуги; $U_{d(n)}$ – действующее значение n -й гармоники в составе сигнала напряжения дуги; $U_{d(1)}$ – действующее значение первой гармоники в составе сигнала напряжения дуги.

Тем не менее исследование [2] также доказывает, что на величину THD тока и напряжения электрической дуги, помимо тепловой постоянной времени θ_d , оказывают влияние такие параметры, как длина электрической дуги L_d , коэффициент несимметрии токов K_{2I} , а также коэффициент вентильного эффекта K_{VA} . Коэффициент несимметрии токов рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{2I} = \frac{I_{d2}}{I_{d1}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где I_{d2} – действующее значение обратной последовательности тока электрической дуги; I_{d1} – действующее

значение прямой последовательности тока электрической дуги.

Несимметрия токов по трём фазам ДСП может быть вызвана как возмущающими воздействиями в процессе плавки, так и заранее предопределённым электрическим режимом работы печи, что подробно рассмотрено в работе [3].

В свою очередь, коэффициент вентильного эффекта K_{VA} определяется следующим выражением:

$$K_{VA} = \frac{E_{d+}}{E_{d-}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где E_{d+} – величина ЭДС электрической дуги в период прохождения положительной полуволны $i_d(t)$; E_{d-} – величина ЭДС электрической дуги в период прохождения отрицательной полуволны $i_d(t)$.

Отметим, что на практике рассчитать K_{VA} с высокой точностью достаточно сложно, поскольку в период прохождения положительной и отрицательной полуволны тока должно соблюдаться условие $L_d = \text{const}$, что в условиях плавки осложняется высокочастотными возмущающими воздействиями в виде мгновенного изменения длины электрической дуги ΔL_d [4].

В работах [2, 5] на математической модели дуговой сталеплавильной печи доказывается, что сигнал KU_d в меньшей мере подвержен влиянию L_d , K_{VA} и K_{2I} по сравнению с сигналом K_{Id} . Вследствие этого анализ гармонического состава сигнала напряжения дуги может быть использован для разработки принципиально нового критерия перехода с одного сочетания ступени печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой на другое в системах управления электрическим режимом работы ДСП второго уровня. Несмотря на высокую адекватность математической модели, данное утверждение необходимо подтвердить экспериментально, что является главной целью данного исследования.

Для решения поставленной в рамках исследования задачи с помощью многоканального регистратора электрических сигналов РЭСЗ были получены сигналы мгновенного значения тока дуги $i_d(t)$ и фазного напряжения $U_{2\phi}(t)$ на вторичной стороне печного трансформатора для трёх фаз ШП-125 на протяжении нескольких плавов. При этом сигнал мгновенного значения напряжения дуги вычисляется косвенно в соответствии со следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_{dA}(t) = u_{2\phi A}(t) - i_{dA}(t)R_{KCA} - \\ - L_{KCA} \frac{di_{dA}(t)}{dt} + (M_{CA} - M_{AB}) \frac{di_{dA}(t)}{dt}, \\ u_{dB}(t) = u_{2\phi B}(t) - i_{dB}(t)R_{KCB} - \\ - L_{KCB} \frac{di_{dB}(t)}{dt} - (M_{AB} + M_{BC}) \frac{di_{dB}(t)}{dt}, \\ u_{dC}(t) = u_{2\phi C}(t) - i_{dC}(t)R_{KCC} - \\ - L_{KCC} \frac{di_{dC}(t)}{dt} - (M_{CA} + M_{BC}) \frac{di_{dC}(t)}{dt}, \end{cases} \quad (7)$$

где $R_{КА,В,С}$ – величина активного сопротивления участка короткой сети для каждой из трёх фаз; $L_{КА,В,С}$ – величина индуктивности участка короткой сети для каждой из трёх фаз; M_{AB}, M_{BC}, M_{CA} – взаимная индуктивность между фазами.

Отметим, что выражение (7) приведено для случая, когда замеры фазного напряжения производились на вторичной стороне печного трансформатора.

Особый интерес в рамках данной работы представляет начальная стадия плавления шихты, для которой характерны частые обрывы электрической дуги ввиду сильных возмущающих воздействий и нестабильного режима горения дуг, а также сильная несимметрия токов. На рис. 1 представлены осциллограммы действующего значения тока электрической дуги, фазного напряжения и напряжения дуги для каждой из трёх фаз, соответствующие первым 12 минутам с начала плавления шихты.

Отметим, что с практической точки зрения, в отличие от математической модели, параметры K_U, K_I (THD_U, THD_I) для оценки гармонического состава сигналов тока и напряжения дуги на начальной стадии плавки являются неудобными, поскольку в мо-

менты обрывов дуг возникают всплески сигнала, обусловленные наличием помехи, фиксируемой измерительным комплексом. Вследствие этого в данной работе для сравнительного анализа гармонического состава сигналов тока и напряжения дуги, по аналогии с исследованием [6], будут использованы следующие параметры:

1. Относительное действующее значение суммарного тока высших гармоник тока и напряжения дуги:

$$I'_{ДВГ\Sigma} = \frac{\sqrt{I_D^2 - I_{Д(1)}^2}}{I_H} \cdot 100\%, \quad (8)$$

$$U'_{ДВГ\Sigma} = \frac{\sqrt{U_D^2 - U_{Д(1)}^2}}{U_{2ФН}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где I_D, U_D – действующее значение тока и напряжения дуги; $I_{Д(1)}, U_{Д(1)}$ – действующее значение первой гармоники тока и напряжения дуги; $I_H, U_{2ФН}$ – номинальное значение тока и фазного напряжения печного трансформатора ДСП (УКП).

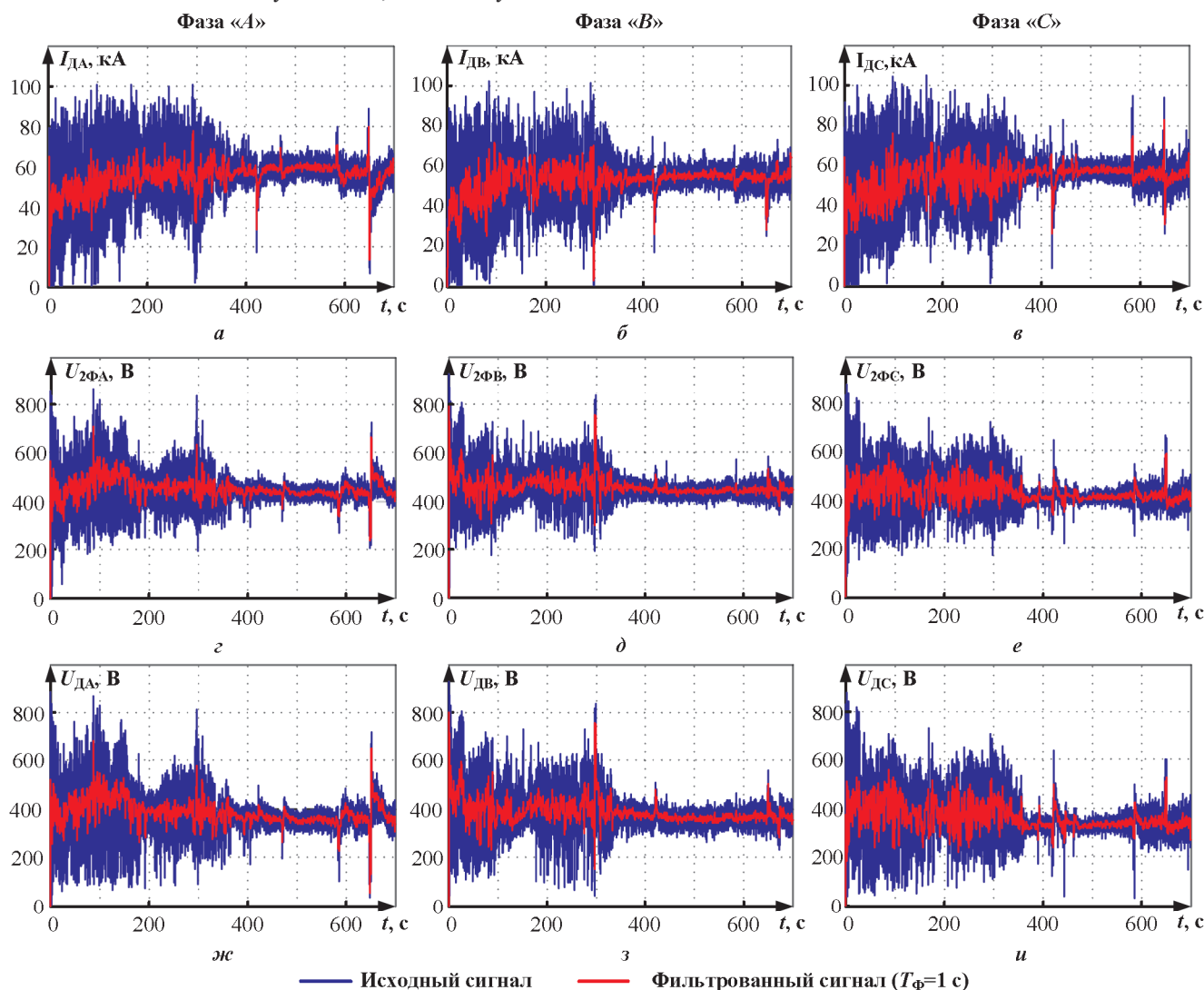


Рис. 1. Графики действующих значений сигналов на протяжении первых 12 минут плавки: а, б, в – токи электрической дуги I_D в фазах «А», «В» и «С»; г, д, е – фазные напряжения в фазах «А», «В» и «С»; ж, з, и – напряжения в фазах «А», «В» и «С» для исходной частоты дискретизации 2 кГц и после применения фильтра скользящей средней с $T_\Phi=1$ с

2. Относительное действующее значение суммарных чётных гармоник тока и напряжения дуги:

$$I'_{д.вг.чѐтѐ} = \frac{\sqrt{I_{д(0)}^2 + I_{д(2)}^2 + I_{д(4)}^2 + I_{д(6)}^2 + I_{д(8)}^2 + I_{д(10)}^2}}{I_H} \times (10)$$

×100%,

$$U'_{д.вг.чѐтѐ} = \frac{\sqrt{U_{д(0)}^2 + U_{д(2)}^2 + U_{д(4)}^2 + U_{д(6)}^2 + U_{д(8)}^2 + U_{д(10)}^2}}{U_{2ФН}} \times (11)$$

×100%,

где $I_{д(0)}$, $I_{д(2)}$, $I_{д(4)}$, $I_{д(6)}$, $I_{д(8)}$, $I_{д(10)}$ – действующие значения 0, 2, 4, 6, 8 и 10-й гармоник тока электрической дуги соответственно; $U_{д(0)}$, $U_{д(2)}$, $U_{д(4)}$, $U_{д(6)}$, $U_{д(8)}$, $U_{д(10)}$ – действующие значения 0, 2, 4, 6, 8 и 10-й гармоник напряжения электрической дуги соответственно; I_H – номинальный ток печного трансформатора на текущей ступени РПН; $U_{2ФН}$ – номинальное фазное напряжение печного трансформатора на текущей ступени РПН.

3. Относительное действующее значение суммарных чётных гармоник тока и напряжения дуги:

$$I'_{д.вг.нечѐтѐ} = \frac{\sqrt{I_{д(3)}^2 + I_{д(5)}^2 + I_{д(7)}^2 + I_{д(9)}^2}}{I_H} \cdot 100\%, (12)$$

$$U'_{д.вг.нечѐтѐ} = \frac{\sqrt{U_{д(3)}^2 + U_{д(5)}^2 + U_{д(7)}^2 + U_{д(9)}^2}}{U_{2ФН}} \cdot 100\%, (13)$$

где $I_{д(3)}$, $I_{д(5)}$, $I_{д(7)}$, $I_{д(9)}$ – действующие значения 3, 5, 7 и 9-й гармоник тока электрической дуги соответственно; $U_{д(3)}$, $U_{д(5)}$, $U_{д(7)}$, $U_{д(9)}$ – действующие значения 3, 5, 7 и 9-й гармоник напряжения электрической дуги соответственно.

На рис. 2 представлена функциональная схема алгоритма расчёта относительного действующего значения суммарного тока чётных и нечётных гармоник тока и напряжения электрической дуги на основании экспериментально полученных сигналов фазного напряжения и тока электрической дуги.

Отметим, что в данной функциональной схеме принято в качестве допущения, что взаимные индуктивности между фазами M_{AB} , M_{BC} , M_{CA} равны нулю.

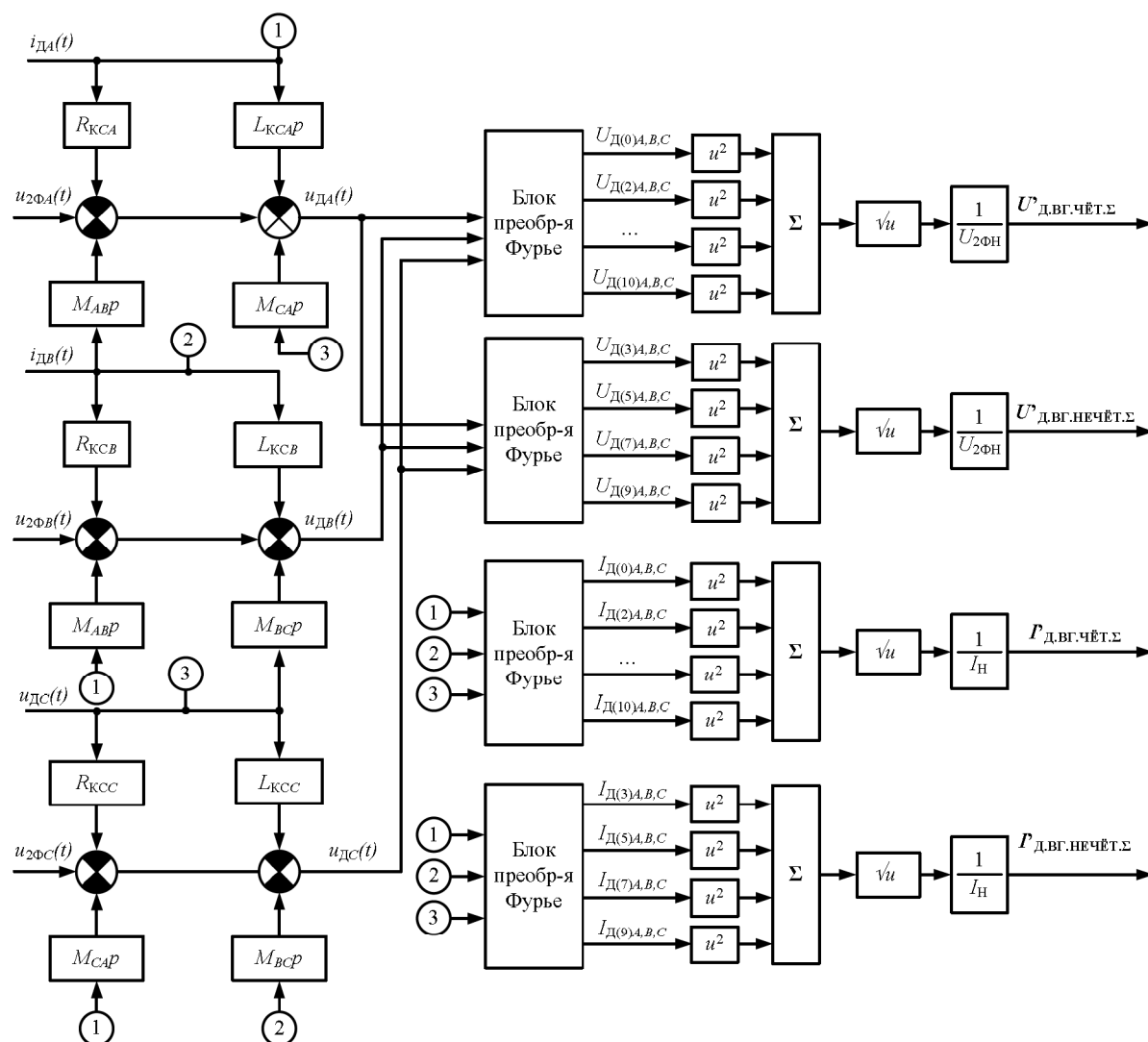


Рис. 2. Функциональная схема алгоритма расчёта относительного действующего значения суммарного тока чётных и нечётных гармоник тока и напряжения электрической дуги

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С помощью функциональной схемы, представленной на **рис. 2**, были получены графики относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник тока и напряжения дуги, а также графики относительного действующего значения суммарных высших гармоник тока и напряжения дуги (**рис. 3–5**).

Визуальный анализ графиков показывает, что скорость уменьшения величины относительного действующего значения суммарных чётных гармоник, как тока, так и напряжения дуги, значительно выше, чем скорость уменьшения относительного действующего значения нечётных гармоник, что подтверждает выводы, сделанные в исследовании [6].

Отметим, что диагностика стадии плавки по величине относительного действующего значения суммарного тока чётных и нечётных гармоник тока дуги лежит в основе функционирования системы управления электрическим режимом, разработанной в рамках патента на полезную модель [7].

Кроме того, характер изменения гармонического состава тока и напряжения дуги имеет общий тренд, что обусловлено общей физической природой, порождающей гармонические искажения сигналов [8-10].

Несмотря на то, что связь между гармоническим составом сигнала тока и напряжения дуги и стадией плавления шихты подтверждается исследованиями [2-8], для их применения в качестве критерия перехода с одного сочетания ступени печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой на другое важным условием является устойчивость параметра к возмущающим воздействиям, характер возникновения которых подробно рассмотрен ранее.

Таким образом, для оценки степени влияния возмущающих воздействий на гармонический состав сигналов тока и напряжения электрической дуги был проведён статистический анализ, результаты которого представлены в **таблице**.

При проведении статистического анализа исследуемый интервал был условно разделён на два временных промежутка: от 0 до 350 с, для которого характерны наиболее сильные колебания относительных действующих значений гармоник тока и напряжения дуги, обусловленные активным расплавлением шихты, и от 350 до 700 с, что соответствует более стабильному режиму горения дуг и значительно меньшим колебаниям гармонического состава.

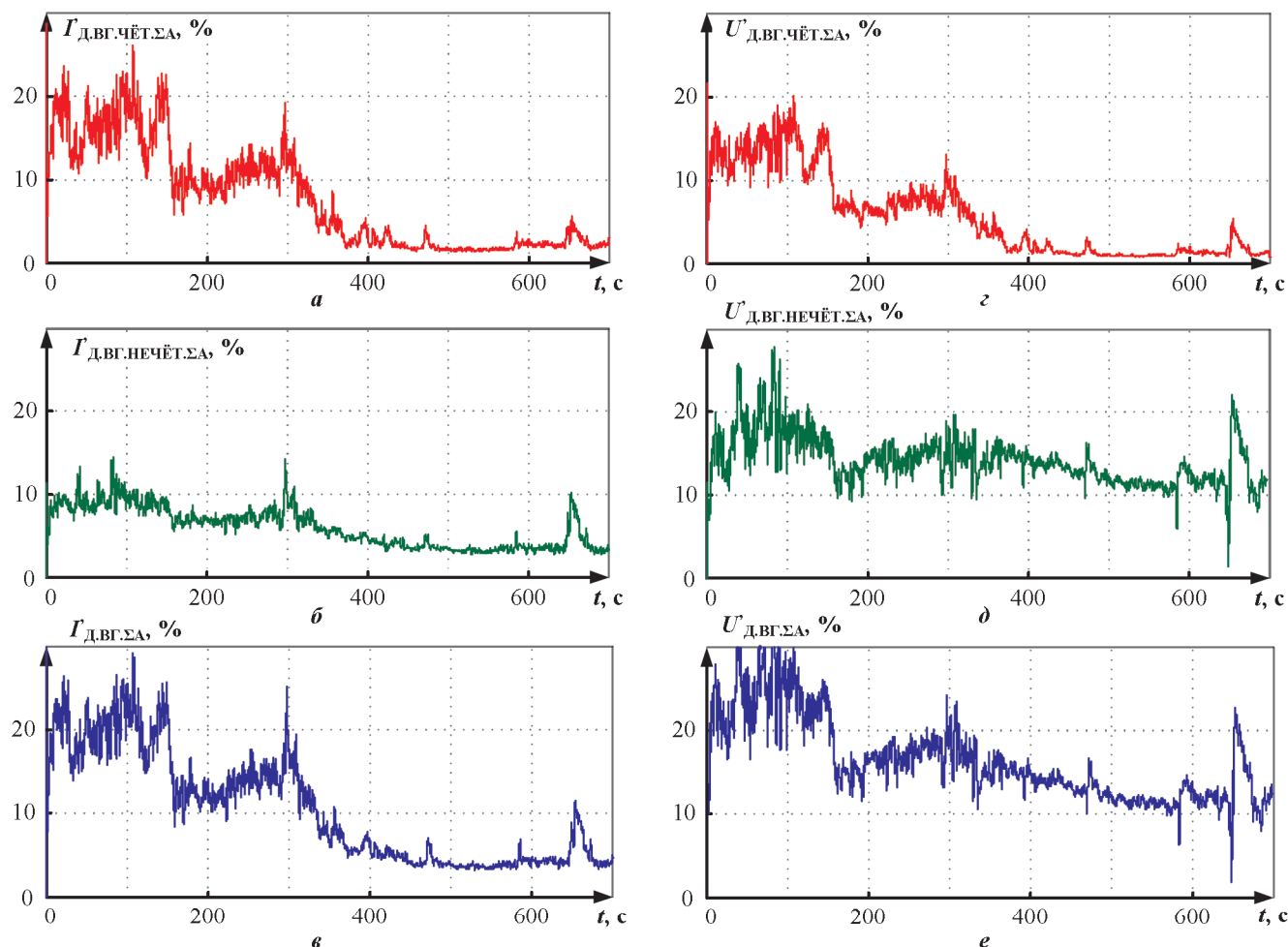


Рис. 3. Графики относительных действующих значений чётных, нечётных и суммарных гармоник (использован фильтр скользящей средней, постоянная времени фильтра $T_{\Phi}=1$ с):
а, б, в – тока электрической дуги; г, д, е – напряжения электрической дуги в фазе «А»

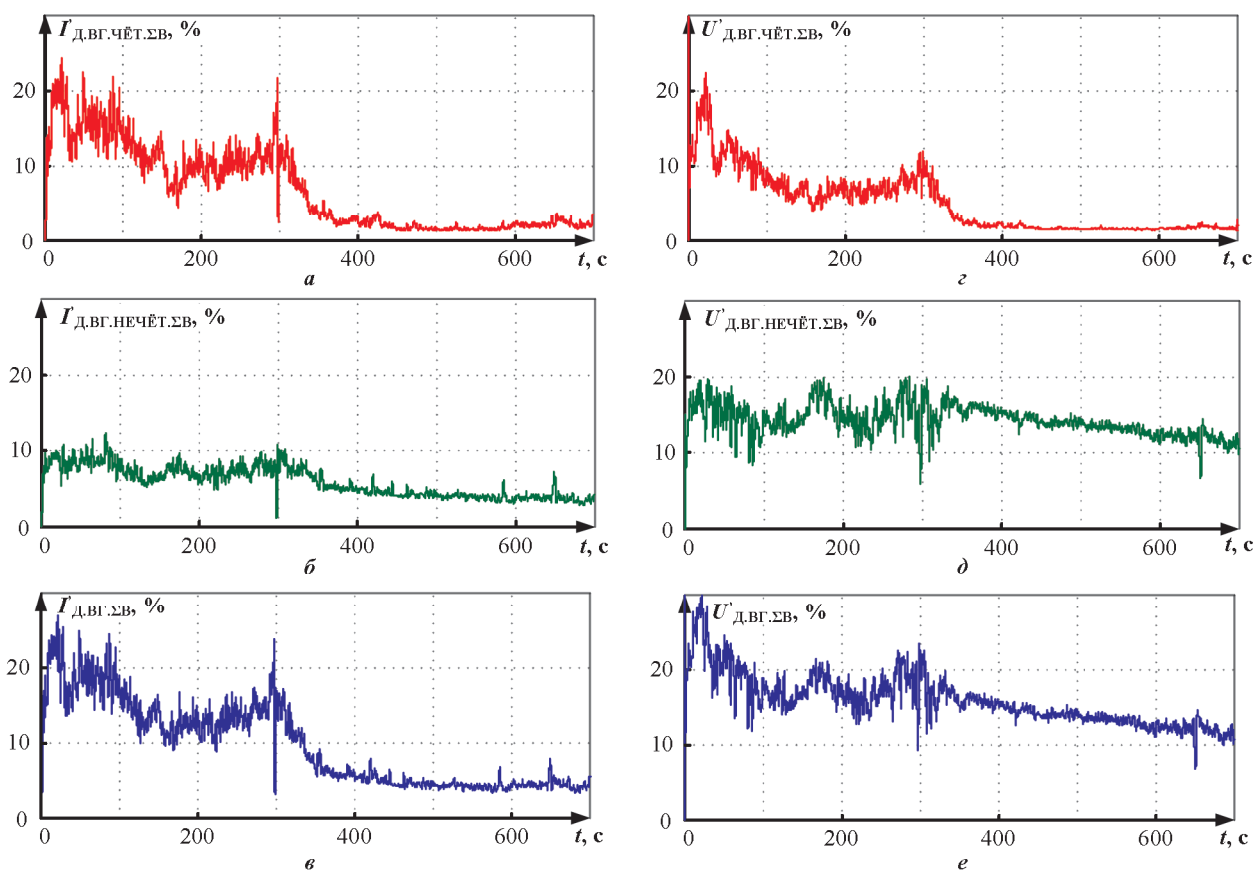


Рис. 4. Графики относительных действующих значений чётных, нечётных и суммарных гармоник (использован фильтр скользящей средней, постоянная времени фильтра $T_{\Phi}=1$ с):
а, б, в – тока электрической дуги; г, д, е – напряжения электрической дуги в фазе «В»

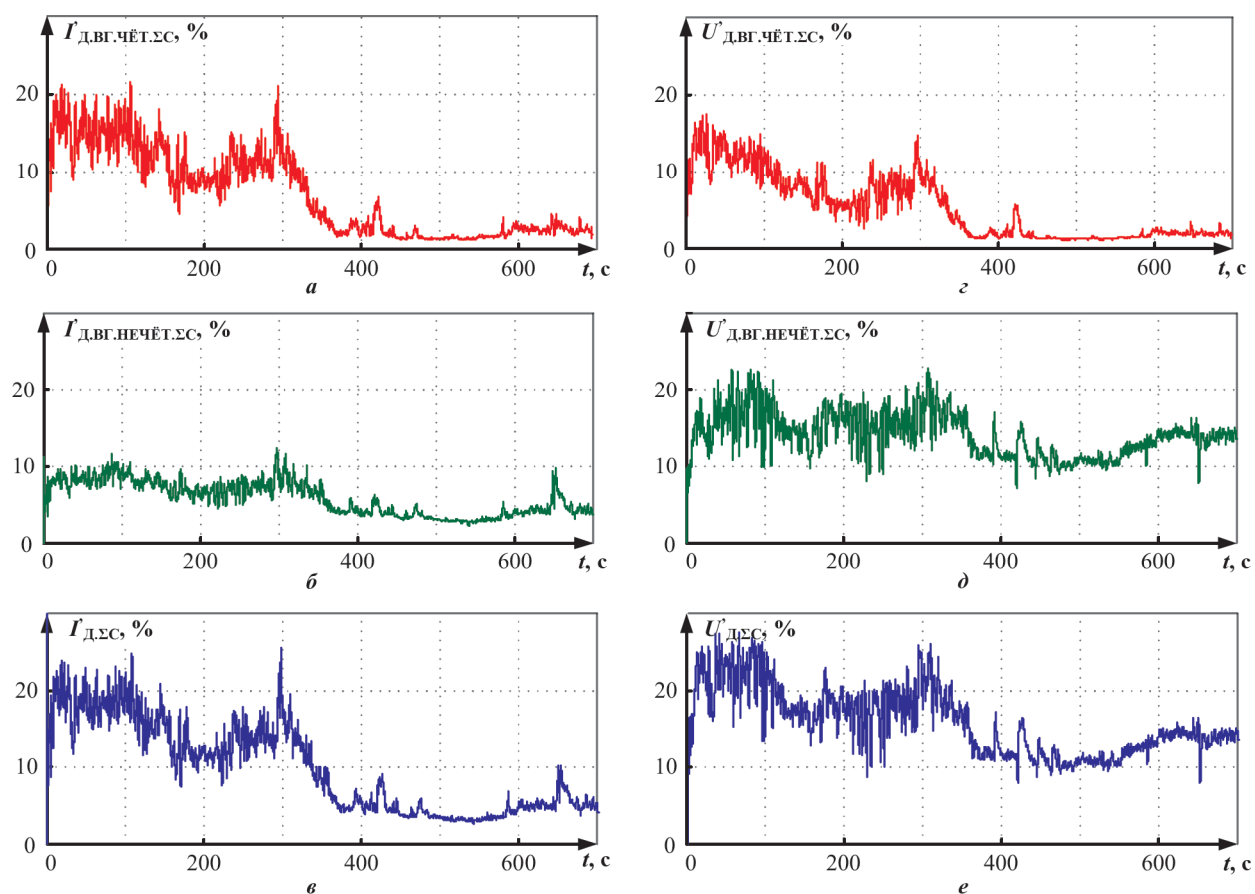


Рис. 5. Графики относительных действующих значений чётных, нечётных и суммарных гармоник:
а, б, в – тока электрической дуги; г, д, е – напряжения электрической дуги в фазе «С»

Статистический анализ гармонического состава сигналов тока и напряжения электрической дуги

Сигнал	Математическое ожидание \bar{X}			Стандартное отклонение σ			Коэффициент вариации K_B			$K_{B,CP}$	$\delta K_{B,CP}$		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C				
t=0...350 с													
Действующие значения:													
Тока дуги I_D	52,60 кА	50,51 кА	51,46 кА	13,4 кА	14,31 кА	14,34 кА	0,25	0,28	0,28	0,27	10 %		
Напряжения дуги U_D	405,05 В	405,82 В	385,65 В	95,78 В	94,88 В	101,67 В	0,24	0,23	0,26	0,243			
Относительное действующее значение суммарных чётных гармоник:													
Тока дуги I_D	12,88 %	11,58 %	11,86 %	8,8 %	7,96 %	8,06 %	0,68	0,69	0,67	0,68	16,18 %		
Напряжения дуги U_D	9,8 %	8,19 %	8,77 %	5,7 %	4,78 %	4,89 %	0,58	0,58	0,55	0,57			
Относительное действующее значение суммарных нечётных гармоник:													
Тока дуги I_D	7,93 %	7,47 %	7,63 %	3,21 %	2,92 %	2,92 %	0,4	0,39	0,38	0,39	15,38 %		
Напряжения дуги U_D	15,48 %	14,93 %	15,68 %	5,49 %	4,35 %	4,96 %	0,35	0,36	0,31	0,33			
Относительное действующее значение суммарных гармоник:													
Тока дуги I_D	15,99 %	14,61 %	14,93 %	8,39 %	7,51 %	7,59 %	0,52	0,51	0,51	0,513	57,12 %		
Напряжения дуги U_D	19,64 %	18,18 %	19,14 %	4,66 %	3,64 %	4,09 %	0,24	0,2	0,21	0,22			
t=350...700 с													
Действующие значения:													
Тока дуги I_D	56,91 кА	54,09 кА	56,25 кА	6,17 кА	4,65 кА	5,34 кА	0,1	0,086	0,095	0,094	-12,8 %		
Напряжения дуги U_D	365,91 В	367,31 В	338,06 В	46,76 В	28,56 В	36,75 В	0,13	0,078	0,11	0,106			
Относительное действующее значение суммарных чётных гармоник:													
Тока дуги I_D	2,23 %	1,98 %	2,083 %	1,73 %	1,31 %	1,67 %	0,76	0,66	0,8	0,74	17,57 %		
Напряжения дуги U_D	1,97 %	2,083 %	1,48 %	1,18 %	0,603 %	1,011 %	0,6	0,57	0,68	0,61			
Относительное действующее значение суммарных нечётных гармоник:													
Тока дуги I_D	3,91 %	4,09 %	3,92 %	1,33 %	0,99 %	1,29 %	0,34	0,24	0,33	0,303	42,57 %		
Напряжения дуги U_D	12,66 %	13,34 %	12,2 %	2,57 %	1,84 %	2,2 %	0,203	0,14	0,18	0,174			
Относительное действующее значение суммарных гармоник:													
Тока дуги I_D	4,69 %	4,7 %	4,6 %	1,88 %	1,29 %	1,81 %	0,401	0,275	0,39	0,36	52,78 %		
Напряжения дуги U_D	12,84 %	13,47 %	12,39 %	2,65 %	1,84 %	2,25 %	0,2	0,14	0,18	0,17			

Для обоих временных промежутков применялись следующие статистические критерии оценивания:

1. Математическое ожидание для дискретного сигнала:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (13)$$

где X_i – i -й элемент выборки; n – объём выборки дискретного сигнала.

2. Стандартное отклонение для дискретного сигнала:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}{n}. \quad (14)$$

3. Коэффициент вариации

$$K_B = \frac{\sigma}{\bar{X}}. \quad (15)$$

4. Средний коэффициент вариации по трём фазам:

$$K_{B,CP} = \frac{1}{3}(K_{BA} + K_{BB} + K_{BC}), \quad (16)$$

где K_{BA} – коэффициент вариации сигнала в фазе «А»; K_{BB} – коэффициент вариации сигнала в фазе «В»; K_{BC} – коэффициент вариации сигнала в фазе «С».

5. Относительная разность среднего по фазам коэффициента вариации для сигнала тока и напряжения дуги:

$$\delta K_{B,CP} = \frac{K_{B,CP,LD} - K_{B,CP,UD}}{K_{B,CP,LD}}, \quad (17)$$

где $K_{B,CP,LD}$ – средний коэффициент вариации по трём фазам для тока дуги; $K_{B,CP,UD}$ – средний коэффициент вариации по трём фазам для напряжения дуги.

Анализ полученных данных показал, что сигналы относительного действующего значения чётных, нечётных и суммарных гармоник напряжения дуги более стабильны и в меньшей мере подвержены влиянию возмущающих воздействий по сравнению с аналогичными сигналами для напряжения дуги при общности тренда. Данный вывод позволяет сделать оценка относительной разности среднего по фазам коэффициента вариации сигнала тока и напряжения дуги.

Отдельно следует отметить тот факт, что согласно экспериментальным данным коэффициент вариации сигналов относительного действующего значения суммарных, чётных и нечётных гармоник напряжения дуги не зависит в значительной мере от коэффициента вариации сигнала действующего значения напряжения электрической дуги. Так, несмотря на то, что на втором временном интервале величина $\delta V_{CP} < 0$ для действующих значений, для относительного действующего значения чётных, нечётных и суммарных гармоник величина δV_{CP} остаётся положительной.

Тем не менее, несмотря на преимущества, которые предоставляет анализ гармонического состава сигнала напряжения дуги для диагностики стадии плавки, расчёт мгновенных значений сигналов мгновенных значений напряжений дуги является ресурсоёмким, и на поздних стадиях плавки является нецелесообразным ввиду равной эффективности с диагностикой стадии по гармоническому составу тока дуги [11-15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании экспериментальных сигналов тока электрической дуги и фазного напряжения, полученных с помощью многоканального регистратора электрических сигналов РЭС-3 на базе дуговой сталеплавильной печи, с помощью специально разработанной математической модели были восстановлены мгновенные значения сигналов напряжения электрической дуги в каждой из трёх фаз. Полученные данные позволили провести сравнительный анализ гармонического состава сигналов тока и напряжения электрической дуги.

2. Анализ гармонического состава сигналов тока и напряжения дуги подтверждает, что оба сигнала могут быть использованы в качестве критерия, на основании которого можно судить о текущей стадии плавления шихты, что важно для своевременной адаптации текущего электрического режима печи системой управления второго уровня путём изменения сочетания ступе-

ни печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой. Установлено, что вывод о более высокой скорости изменения чётных гармоник тока по сравнению с нечётными также применителен к гармоникам напряжения дуги.

3. На нестабильном участке плавки предпочтительнее использовать анализ гармонического состава напряжения дуги, поскольку данный показатель в меньшей мере подвержен возмущающим воздействиям в виде мгновенного изменения длины электрической дуги, а также несимметрии токов. В этом случае сводится к минимуму вероятность несвоевременного изменения электрического режима вследствие некорректной реакции системы управления второго уровня на всплеск гармонических составляющих, обусловленный технологическим коротким замыканием. Частично решить данную проблему можно путём увеличения постоянной времени фильтрации параметра регулирования. Тем не менее на начальной стадии плавки продолжительность технологических этапов сравнительно невысока, вследствие чего чрезмерное увеличение времени фильтрации может привести к обратной ситуации, когда переход с одного режима плавки на другой производится несвоевременно.

4. Расчёт мгновенных значений напряжения электрической дуги в производственных условиях является ресурсоёмкой задачей и требует наличия значительных вычислительных мощностей. При этом на стабильных стадиях плавления, когда степень влияния возмущающих воздействий сведена к минимуму, эффективность диагностики стадии плавки по высшим гармоникам токов и напряжений дуг практически одинакова. Данную особенность необходимо учитывать в дальнейших исследованиях при разработке усовершенствованных систем управления электрическим режимом работы ДСП, в основе которой лежит методика диагностики стадии плавки по высшим гармоникам токов и напряжений дуг.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ, МК №3230.2018.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity). CIGRE Report, no. 102, 1939.
2. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. Assessing the Feasibility of Electrical Mode Control of Ultra-High Power Arc Steelmaking Furnace Based on Data about Harmonic Composition of Arc Currents and Voltages// Proceedings of 16th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM2015). IEEE. Bochum, Germany, November 18-20, 2015. pp. 302-308, DOI: 10.1109/REM.2015.73804112.
3. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace// in Proc. 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2016, pp. 033-037. DOI:10.1109/MECATRONICS.2016.7547111.
4. Nikolaev A.A.; Tulupov P.G.; Savinov D.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs// International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) pages 1-6, 2017, DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076205
5. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Antropova L.I. Heating stage

- diagnostics of the electric arc furnace based on the data about harmonic composition of the arc voltage // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), DOI:10.1109/EIConRus.2018.8317198
6. Николаев А.А., Руссо Ж.-Ж., Спымански В., Тулупов П.Г. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120
 7. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ануфриев А.В. Система управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи: патент на полезную модель №176106, 2018
 8. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics, Verlag Stahleisen GmbH. Düsseldorf, 2009.
 9. Jaipradidtham C.A Control of Real Voltage and Harmonic Analysis with Adaptive Static Var of Electric Arc Furnace for Power Quality Improvement by Grey Markov Method // Proceedings of the Power Systems (ICPS), 2016 IEEE 6th International Conference on. New Delhi, India. 2016. pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICPS.2016.7584250.
 10. Harmonic Measurements and Analysis in a Modern Steel Manufacturing Facility / Bao M., Xia J., Yin X., Dong M., He H., He J. // Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. Providence. RI. USA. 2010. pp.1-6. DOI: 10.1109/PES.2010.5589983
 11. Influence of a SVC on AC Arc Furnaces Harmonics, Flicker and Unbalance. Measurement and Analysis / Donsión M.P., Güemes J.A., Oliveira F. // Proceedings of the MELECON 2010 – 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Valleta. Malta. Pp. 1423-1428. DOI: 10.1109/MELCON.2010.5476032.
 12. Power Quality Measurements in a Steel Industry with Electric Arc Furnaces / Issouribehere P.E., Barbero J.C., Issouribehere F., Barbera A. // Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. Pittsburgh. PA. USA. 2008. pp. 1-8. DOI: 10.1109/PES.2008.4596177.
 13. Harmonics and Interharmonics Analysis of Electrical Arc Furnaces Based on Spectral Model Optimization with High Resolution Windowing / Vatankulu Y.E., Sentirk Z., Salor O. // IEEE Transactions on Industry Applications. Issue 99. 2017. pp. 1-8. DOI:10.1109/TIA.2017.2669328.
 14. Online Characterization of Interharmonics and Harmonics of AC Electric Arc Furnaces by Multiple Synchronous Reference Frame Analysis / Uz-Logoglu E., Salor O., Ermis M. // IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 52, Issue 3. 2016. pp. 2673-2683. DOI: 10.1109/TIA.2016.2524455.
 15. Power Quality Indices: A Saudi Steel Mill Case Study / El-Amin I.M., Al-Elyani A., Shuaib A. // Proceedings of the Computing, Electrical and Electronics Engineering (IC-CEEE), 2013 International Conference on. Khartoum, Sudan. 2013. pp. 99-102. DOI: 10.1109/ICCEEE.2013.6633914.

Поступила в редакцию 02 октября 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ELECTRIC ARC CURRENT AND ELECTRIC ARC VOLTAGE HARMONIC COMPOSITION OF POWERFUL SHAFT ELECTRIC ARC FURNACE

Alexander A. Nikolaev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>.

Platon G. Tulupov

Post-graduate student, the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Tulupov.pg@mail.ru.

Evgeniy Ya. Omelchenko

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: momentum2@yandex.ru.

During the present scientific research, instantaneous values of the electric arc voltage were obtained for the alternative current three-phase shaft electric arc furnace SF-125. The calculation of the electric arc voltage signal were provided for early melting stage on the base of designed mathematical model, measured signals of phase voltage and electric arc current and predetermined parameters of electric circuit. The obtained results made it possible to accomplish the comparative analysis of electric arc current and electric arc voltage harmonics fluctuations including analysis of the relative RMS values for odd, even and total harmonics. Consequently, it is clear that harmonic composition of the electric arc voltage is more stable against non-symmetrical modes and random disturbances of electric arc length in comparison with harmonic composition of the electric arc voltage. Therefore, the method of heating stage diagnostic based on the data about harmonic composition of the electric arc voltage may be efficiently applied in electric modes control systems, providing the rise of energy efficiency for steelmaking

complex. Nevertheless, at the late stages of melting heating stage diagnostic methods based on the data about harmonic composition of electric arc current and electric arc voltage have equal efficiency. Due to this fact, resource-intensive calculation of the electric arc voltage instantaneous values becomes unreasonable.

Keywords: electric arc furnace, electric arc, Fourier transformation, harmonic data analysis, heating stage diagnostic.

REFERENCES

1. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity). CIGRE Report No. 102, 1939.
2. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. Assessing the Feasibility of Electrical Mode Control of Ultra-High Power Arc Steelmaking Furnace Based on Data about Harmonic Composition of Arc Currents and Voltages. Proceedings of 16th International Conference on Research and Education in

- Mechatronics (REM2015). IEEE. Bochum, Germany, November 18-20, 2015, pp. 302-308, DOI: 10.1109/REM.2015.73804112.
3. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace. Proc. 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2016, pp. 033-037. DOI:10.1109/MECATRONICS.2016.7547111.
4. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Savinov D.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pages 1-6, 2017, DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076205
5. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Antropova L.I. Heating stage diagnostics of the electric arc furnace based on the data about harmonic composition of the arc voltage. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), DOI:10.1109/EIconRus.2018.8317198
6. Nikolaev A.A., Rousseau J.-J., Szymanski V., Tulupov P.G. An experimental study of electric arc current harmonics in electric arc furnaces with different power characteristics. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol.14, no. 3, pp. 106-120. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120 (in Russian)
7. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. *Sistema upravleniya ehlektricheskim rezhimom dugovoj staleplavilnoj pechi* [Electric mode control system of the electric arc furnace]: Russian Federation effective model №176106, 2018. (in Russian)
8. B. Bowman, K. Krüger, Arc Furnace Physics, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2009.
9. Jaipradidtham C., A Control of Real Voltage and Harmonic Analysis with Adaptive Static Var of Electric Arc Furnace for Power Quality Improvement by Grey Markov Method. Proceedings of the Power Systems (ICPS), 2016 IEEE 6th International Conference on. New Delhi, India. 2016, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICPES.2016.7584250.
10. Bao M., Xia J., Yin X., Dong M., He H., He J. Harmonic Measurements and Analysis in a Modern Steel Manufacturing Facility. Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting, 2010, IEEE. Providence. RI. USA. 2010. pp.1-6. DOI: 10.1109/PES.2010.5589983
11. Donsión M.P., Güemes J.A., Oliveira F. Influence of a SVC on AC Arc Furnaces Harmonics, Flicker and Unbalance. Measurement and Analysis. Proceedings of the MELECON 2010 – 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Valletta. Malta, pp. 1423-1428. DOI: 10.1109/MELCON.2010.5476032.
12. Issouribehere P.E., Barbero J.C., Issouribehere F., Barbera A. Power Quality Measurements in a Steel Industry with Electric Arc Furnaces. Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. Pittsburgh. PA. USA. 2008, pp. 1-8. DOI: 10.1109/PES.2008.4596177.
13. Vatankulu Y.E., Sentirk Z., Salor O. Harmonics and Interharmonics Analysis of Electrical Arc Furnaces Based on Spectral Model Optimization with High Resolution Windowing. IEEE Transactions on Industry Applications. Issue 99, 2017, pp. 1-8. DOI:10.1109/TIA.2017.2669328.
14. Uz-Logoglu E., Salor O., Ermis M. Online Characterization of Interharmonics and Harmonics of AC Electric Arc Furnaces by Multiple Synchronous Reference Frame Analysis. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 52, iss. 3, 2016, pp. 2673-2683. DOI: 10.1109/TIA.2016.2524455.
15. El-Amin I.M., Al-Elyani A., Shuaib A. Power Quality Indices: A Saudi Steel Mill Case Study. Proceedings of the Computing, Electrical and Electronics Engineering (ICCEEE), 2013 International Conference on. Khartoum, Sudan. 2013, pp. 99-102. DOI: 10.1109/ICCEEE.2013.6633914.

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Омельченко Е.Я. Экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений дуг мощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 63-72. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-63-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-63-72)

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Omelchenko E.Ya. Experimental Analysis of Electric arc Current and Electric arc Voltage Harmonic Composition of Powerful Shaft Electric arc Furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 63-72. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-63-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-63-72)