

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.365.22 + 621.311.44 + 681.515.4 + 621.3.011.72

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ ДУГ ДЛЯ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ

Николаев А.А.¹, Руссо Ж.-Ж.², Сцымански В.², Тулупов П.Г.¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² Университет Жана Монне, Сент-Этьен, Франция

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): авторами статьи были проведены экспериментальные исследования гармонического состава тока дуговых сталеплавильных печей разной мощности и класса, функционирующих на различных металлургических предприятиях России. **Цель работы:** провести комплексный анализ изменения высших гармоник тока электросталеплавильных агрегатов, выявить закономерности изменения отдельных гармонических составляющих, а также определить средние и максимальные уровни гармоник для дуговых печей каждого типа. **Используемые методы:** исследования проводились на основании массивов мгновенных значений токов, записанных с помощью быстродействующих многоканальных регистраторов электрических сигналов. Обработка данных осуществлялась в математическом пакете Matlab с приложением Simulink, где с помощью методов спектрального анализа и разработанных алгоритмов обработки сигналов выполнялся расчет основных коэффициентов гармонических составляющих тока электродуговых установок. **Результат:** по результатам исследований отмечены особенности влияния технологических факторов и параметров силового электрооборудования дуговых печей на уровни гармонических составляющих на различных стадиях плавки. Сделан вывод о необходимости учета максимальных уровней значимых гармоник при выборе параметров фильтрокомпенсирующих цепей статических компенсаторов реактивной мощности. Проведен сравнительный анализ скорости изменения суммарных действующих значений четных и нечетных гармонических составляющих, который показал важную закономерность превышения скорости ослабления четных гармоник дуговой печи над нечетными в несколько раз. На основании этого показана целесообразность использования среднеквадратического значения тока четных гармоник для целей диагностики стадий плавки в дуговой сталеплавильной печи с классическим технологическим процессом. **Новизна:** результаты исследования являются новыми, т.к. впервые проведен комплексный анализ характера измерения высших гармоник тока для электродуговых установок широкого класса, включающий помимо дуговых сталеплавильных печей с традиционной технологией плавления шихты и классических установок ковш-печь также печи с непрерывной конвейерной подачей лома и шахтные печи с предварительным подогревом шихтового материала с помощью отходящих газов. **Практическая значимость:** полученные результаты исследований имеют большую теоретическую значимость для электротехники дуговых сталеплавильных печи и могут найти практическое применение при расчете параметров устройств компенсации реактивной мощности, функционирующих в системах электроснабжения электросталеплавильных комплексов. Выявленные закономерности могут быть использованы при решении задач диагностики технологических стадий плавки и создании усовершенствованных систем автоматического управления электрическими режимами дуговых сталеплавильных печей.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, установка ковш-печь, гармонический состав токов, качество электроэнергии, статический тиристорный компенсатор, компенсация реактивной мощности, фильтрация высших гармоник, система автоматического управления перемещением электродов, диагностика стадий плавки для дуговой печи.

© Николаев А.А., Руссо Ж.-Ж., Сцымански В., Тулупов П.Г., 2016

Введение

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) и установки ковш-печь (УКП) являются основными агрегатами электросталеплавильных комплексов металлургических предприятий. С точки зрения электротехники отличительными особенностями данных установок являются: 1) значительная мощность силового электрооборудования и большое потребление электроэнергии, которое у крупных электросталеплавильных цехов со сверхмощными ДСП может достигать 1 ТВт·ч/год; 2) нелинейный, несимметричный, резкопеременный и случайный характер изменения нагрузки, обуславливающий сильное влияние режимов работы ДСП и УКП на качество электроэнергии в питающей сети; 3) низкий коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,72\text{--}0,85$, приводящий к потреблению большой величины реактивной мощности из сети и являющийся причиной колебаний и отклонений напряжения в точках подключения печных трансформаторов [1]. Все это обуславливает необходимость использования в системах электроснабжения электросталеплавильных комплексов специализированных устройств компенсации реактивной мощности, таких как: статический тиристорный компенсатор (СТК), усовершенствованный статический компенсатор типа СТАТКОМ, силовые резонансные фильтры или фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ). Выбор типа компенсирующего устройства зависит от мощности ДСП и УКП, параметров питающей сети и требований к качеству электроэнергии в точке общего подключения комплекса «ДСП-УКП» и других электрических нагрузок [2]. В свою очередь, с позиций теории автоматического управления ДСП и УКП являются сложными нелинейными объектами регулирования, в которые входят трехфазный электрический контур ДСП (УКП) и гидравлический привод перемещения электродов. Это обуславливает применение систем автоматического управления положением электродов с адаптивными нелинейными регуляторами, обеспечивающими заданные показатели регулирования во всем диапазоне изменения длин дуг при различных вторичных напряжениях печного трансформатора и разной индуктивности электрического контура [3]. Кроме этого, для управления электрическими режимами ДСП (УКП) требуется осуществлять выбор оптимальных электрических и технологических параметров дуговой печи для каждой из стадий плавки, при

этом имеет место важная задача своевременного перехода с одного режима на другой при смене технологических стадий плавки. Для решения этих задач используются системы управления второго уровня, в которых реализованы профили (программы) для управления процессом плавки. Чаще всего в данных системах в качестве основного параметра переключения электрических режимов используется абсолютный или удельный расход электрической энергии, рассчитанный на вторичной стороне печного трансформатора [1, 3, 5].

При проектировании систем электроснабжения ДСП и УКП, а также при выборе конфигурации и расчете параметров фильтрокомпенсирующих цепей компенсаторов реактивной мощности важной информацией является гармонический состав тока дуговой печи. В отличие от устройств преобразовательной техники, таких как тиристорные преобразователи и преобразователи частоты, где присутствуют канонические четные гармоники, величина которых может быть вычислена с достаточной точностью по аналитическим выражениям, гармонический состав тока ДСП и УКП включает в себя также четные гармоники и промежуточные интергармоники [6–8]. Амплитуды гармоник в данном случае изменяются в широком диапазоне в зависимости от стадий плавки, при этом характер изменения является случайным. Исследования гармонического состава токов ДСП и УКП, проведенные российскими и зарубежными учеными, позволили разработать ряд инженерных методик, с помощью которых можно провести оценку величины коэффициента суммарных искажений напряжения в точке подключения ДСП и УКП и обосновать целесообразность использования того или иного типа компенсатора реактивной мощности [7]. В ряде литературных источников приведена информация о средних уровнях высших гармоник ДСП различной мощности на начальной и конечной стадиях плавки [8–15]. Однако в данных источниках отсутствуют результаты исследований характера изменения отдельных гармоник во времени в течение плавки, не анализируются уровни интергармоник, не оцениваются максимальные значения гармонических составляющих на отдельных стадиях. Данная информация является необходимой для корректного расчета параметров фильтров высших гармоник компенсирующего устройства ДСП (УКП). В источнике [8] исследования были проведены на ДСП с устаревшей технологией

ведения плавки без использования агрегатов внепечной обработки стали УСП. Кроме того, в указанной литературе не приведены исследования для ДСП, где используются современные энергосберегающие технологии, такие как: подогрев шихты отходящими газами – шахтные печи, непрерывная конвейерная подача шихты в ванну печи – печи с технологией Consteel. Также не был исследован гармонический состав токов установок УСП.

Информация о гармоническом составе токов ДСП может быть использована для определения технологических стадий плавки и уровня вспененного шлака в ванне печи на стадиях, когда электрические дуги горят на жидкую ванну. Системы диагностики уровня шлака успешно используются в системах управления электрическими режимами ведущих зарубежных фирм-производителей Primetals Technologies (Melt Expert, ARCOS, SIMELT), Danieli (HI-REG, Q-REG), Amec Spie (E.M.P.E.R.E) и др. [1, 16]. Однако системы диагностики стадий плавки с использованием высших гармоник тока в настоящее время еще не нашли применения. Существует ряд патентов [17, 18], где описываются определенные способы ведения плавки с использованием информации о высших гармониках, однако в них отсутствует анализ закономерностей изменения гармонических составляющих в процессе работы печи. В данном случае актуальной задачей является проведение дополнительных исследований изменения гармонических составляющих дуговой печи в течение цикла плавки и определение наиболее подходящих параметров и коэффициентов для диагностики технологических стадий плавки.

В данной статье приведены исследования гармонического состава токов электросталеплавильных агрегатов различного класса и мощности, в которых применяются как традиционная технология выплавки стали с поэтапной завалкой лома с помощью загрузочной бадьи, так и технология непрерывной конвейерной подачи шихты в жидкую ванну ДСП (дуговая печь Consteel от компании Danieli). Кроме этого, исследованы ДСП, где выплавка стали осуществляется с использованием жидкого чугуна и технологии предварительного подогрева лома отходящими газами (шахтные печи (ШП) от Siemens VAI). Выполнена оценка гармонического состава токов для классической установки ковш-печь. В ходе исследований проанализирован характер изменения гармоник на основных стадиях плав-

ки исследуемых ДСП и УСП, определены средние и максимальные уровни гармоник. Данная информация является актуальной при расчете параметров фильтрокомпенсирующих цепей компенсаторов реактивной мощности. Для задач диагностики стадий плавки в ДСП рассмотрен характер изменения четных и нечетных гармоник, на основании которого выбран наиболее подходящий параметр для определения технологических стадий.

1. Экспериментальное исследование характера изменения гармонического состава токов в течение цикла плавки в дуговой сталеплавильной печи

В соответствии с теорией электротехники дуговых сталеплавильных печей [19] наличие высших гармоник в токе ДСП обусловлено нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) электрической дуги. Форма ВАХ дуги зависит от условий горения, влияющих на интенсивность процессов ионизации и деионизации в дуговом столбе. Наиболее точным методом математического описания электрических свойств дуги переменного тока является использование нелинейного дифференциального уравнения Касси, описывающего изменение мгновенной проводимости дуги [5]. В данном уравнении ключевым параметром является тепловая постоянная времени дуги θ_d , значение которой в зависимости от стадии плавки находится в диапазоне от $\theta_d = 0,3-5,5$ мс. Нижний диапазон соответствует начальной стадии расплавления шихты, верхний – стадии доводки металла, где электрические дуги горят на жидкую ванну. Величина θ_d оказывает влияние на уровень нечетных гармоник ДСП. В симметричном трехфазном электрическом контуре ДСП, при условии равенства активных сопротивлений, индуктивностей, взаимоиндуктивностей и напряжений электрических дуг, ток ДСП содержит только нечетные гармоники, не кратные трем. При возникновении несимметрии токов при неодинаковых длинах и напряжениях дуг появляются гармоники, кратные трем. Для появления постоянной составляющей и четных гармоник в токах ДСП необходимо наличие «вентильного эффекта», возникающего из-за неодинаковых противо-ЭДС электрических дуг при чередовании анода и катода на электроде и шихте. В реальных условиях на действующем оборудовании вентильный эффект также является причиной появления промежуточных интергармоник, которые обу-

словлены различной формой положительной и отрицательной полуволн тока. На **рис. 1** показаны результаты скоростной фотосъемки столба электрической дуги [20] в моменты времени, когда катодом является электрод, а анодом – шихта (**рис. 1, а**), что соответствует положительной полуволне тока. Обратная ситуация для отрицательной полуволны тока (анод – электрод, катод – шихта) приведена на **рис. 1, б**. Видно, что в первом случае горение дуги является устойчивым, а во втором случае из-за большей противоЭДС дуги процесс горения является нестабильным, что приводит к сильному искажению отрицательной полуволны тока. Вентильный эффект наиболее сильно проявляется в первые 5 мин стадии начального расплавления шихты.

На **рис. 2** приведены реальные мгновенные значения тока ДСП-10 (10 МВА) ООО «БВК» (г. Челябинск) для небольших интервалов времени на различных стадиях плавки. Осциллограмма на **рис. 2, а** соответствует начальной стадии расплавления, где происходит неустойчивое горение дуги. Здесь в явной форме наблюдается явление вентильного эффекта: отношение амплитуд полуволн тока составляет $K_B = +I_{мДСП}/-I_{мДСП} = 780/580 = 1,35$, также в токе присутствуют четные гармоники и интергармоники (**рис. 2, б**). В процессе расплавления шихты условия горения дуг улучшаются, что приводит к ослаблению коэффициента вентильного эффекта K_B и увеличению тепловой постоянной дуги θ_d , при этом уровни четных, нечетных и интергармоник снижаются (**рис. 2, в и г**). На стадии доводки металла, когда электрические дуги горят на жидкую ванну под слоем вспененного шлака, искажение формы мгновенного тока является минимальным

(**рис. 2, д и е**). В данном случае коэффициент суммарных искажений тока K_I имеет наименьшее значение.

Необходимо отметить, что анализ гармонического состава токов по осциллограммам на **рис. 2** не может считаться полным из-за непостоянства уровней гармоник в отдельные моменты времени. Как отмечалось ранее, амплитуды в ДСП изменяются в широком диапазоне, при этом характер изменения является случайным. В соответствии с этим для качественного анализа характера изменения гармонических составляющих необходимо построение временных зависимостей по гармоникам для всего цикла плавки в ДСП или цикла обработки металла в У КП. В **табл. 1** приведена информация о технических данных электрооборудования электросталеплавильных агрегатов, которые были выбраны в качестве объектов исследования. На каждом из них с помощью многоканального регистратора электрических сигналов была выполнена запись мгновенных значений токов и напряжений с высокой частотой дискретизации 4000 Гц. В этом случае в соответствии с теоремой Котельникова максимальная распознаваемая частота в спектре сигнала составляет 2000 Гц (40-я гармоника). Исследования, проведенные ранее [1, 8–16], показали, что максимальный номер значимых гармоник ДСП и У КП не превышает $n = 11$, поэтому исследуемый частотный диапазон для четных и нечетных составляющих был принят от 0 до 550 Гц. Действующее значение всех высших гармоник $I_{вг\Sigma}$ и коэффициент суммарных искажений тока K_I рассчитывались без ограничения частотного диапазона на максимальной частоте дискретизации.



Рис. 1. Результаты скоростной фотосъемки столба электрической дуги при положительной и отрицательной полуволнах тока

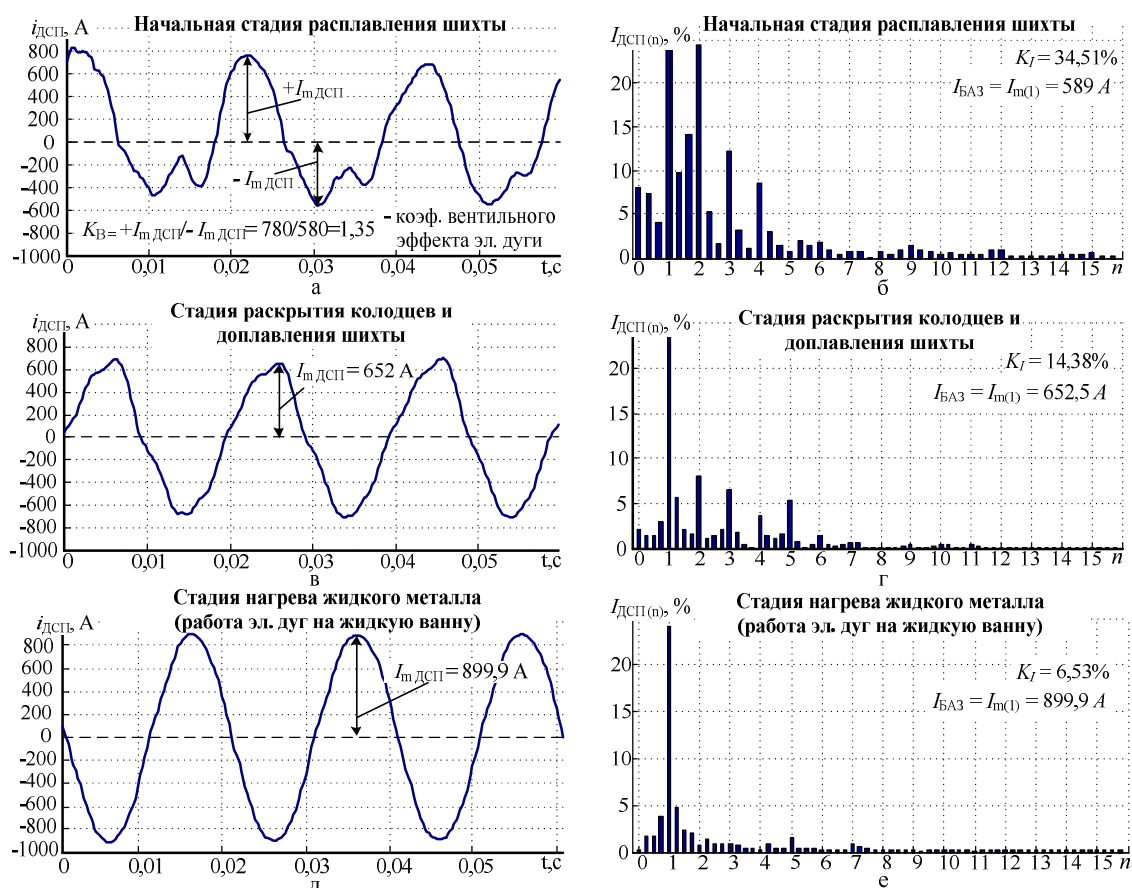


Рис. 2. Гармонический состав токов ДСП-10 (10 МВА) на различных стадиях плавки

Таблица 1

Технические данные электрооборудования и параметры систем электроснабжения исследуемых электросталеплавильных агрегатов

Наименование параметра	Тип электросталеплавильного агрегата					
	Шахтная печь ШП-120 т, ЗАО «Северсталь – Сортовой завод Балаково»	Шахтная печь ШП-120 т, ЧерМК ПАО «Северсталь»	Дуговая сталеплавильная печь ДСП-120 т, ПАО «Ашинский металлургический завод»	Дуговая сталеплавильная печь ДСП-10 т, ООО «БВК»	Дуговая сталеплавильная печь ДСП-1,5 т, ООО «СУМВЗ»	Установка ковш-печь УПК 180 т, ЭСПЦ ОАО «ММК»
1. Номинальная мощность тр-ра S_H , МВА	85	85	90	10	1,25	26
2. Номинальное напряжение первичной обмотки тр-ра $U_{ЛН}$, кВ	35	35	35	10	6	110
3. Диапазон изменения вторичного напряжения тр-ра U_2 , кВ	0,67–1,15	0,67–1,15	0,65–1,00	0,2–0,38	0,103–0,225	0,29–0,37
4. Номинальный первичный ток тр-ра $I_{1Н}$, А	1109–1402	1109–1402	1123–1485	577,4	120,3	136,5
5. Номинальный вторичный ток тр-ра $I_{2Н}$, кА	42,7–57,9	42,7–57,9	52,0–60,5	15,2	3,21	35,7–40,5
6. Ном. мощность реактора $Q_{Р.Н.}$, МВАр	8,8	8,8	Отсутствует	1,8	Отсутствует	Отсутствует
7. Ср. знач. мощности КЗ в точке подключения тр-ра $S_{КЗ}$, МВА	750	838	919	179	52,4	3300
8. Параметры КУ в системе электроснабжения ДСП (УКП)	СТК 135 МВАр (ТРГ, Ф2,3,4)	Отсутствует	СТК 100 МВАр (ТРГ, Ф2,3,4)	ФКУ 6,3 МВАр (Ф2,3,4)	Отсутствует	Отсутствует

При исследовании изменения гармоник во времени для удобства анализа были введены относительные параметры ($I'_{\text{ВГ.}\Sigma}$, $I'_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}$, $I'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma}$, $I'_{\text{ИГ.}\Sigma}$, $I_{(0)} - I_{(11)}$), приведенные к базовой величине – номинальному значению первичного тока печного трансформатора I_H . В отличие от коэффициентов n -ых гармонических составляющих тока $K_{I(n)}$, рассчитываемых относительно 1-ой гармоники, использование этих параметров позволяет избежать сильного повышения относительного уровня гармоник в моменты, когда в одной из фаз возникают обрывы дуг или режимы прерывистого тока. В этом случае наличие помех в измеряемом сигнале оказывало бы значительное воздействие из-за малой величины первой гармоники тока. Ниже приведены выражения, по которым осуществлялся расчет перечисленных относительных параметров.

1. Относительное действующее значение суммарного тока высших гармоник:

$$I'_{\text{ВГ.}\Sigma} = \frac{\sqrt{I_{\text{ДСП}}^2 - I_{\text{ДСП}(1)}^2}}{I_H} \cdot 100\%,$$

где $I_{\text{ДСП}}$ – действующее (среднеквадратичное) значения тока ДСП (УКП), измеренное на основании мгновенного значения тока дуговой печи; $I_{\text{ДСП}(1)}$ – действующее значение первой гармоники тока ДСП (УКП); I_H – номинальный ток печного трансформатора ДСП (УКП).

2. Относительное действующее значение суммарного тока четных гармоник:

$$I'_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma} = \frac{\sqrt{I_{\text{ДСП}(0)}^2 + I_{\text{ДСП}(2)}^2 + I_{\text{ДСП}(4)}^2 + I_{\text{ДСП}(6)}^2 + I_{\text{ДСП}(8)}^2 + I_{\text{ДСП}(10)}^2}}{I_H} \times (2) \times 100\%,$$

где $I_{\text{ДСП}(2)}$, $I_{\text{ДСП}(4)}$, $I_{\text{ДСП}(6)}$, $I_{\text{ДСП}(8)}$, $I_{\text{ДСП}(10)}$ – действующие значения значимых четных гармоник ДСП.

3. Относительное действующее значение суммарного тока нечетных гармоник:

$$I'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma} = \frac{\sqrt{I_{\text{ДСП}(3)}^2 + I_{\text{ДСП}(5)}^2 + I_{\text{ДСП}(7)}^2 + I_{\text{ДСП}(9)}^2 + I_{\text{ДСП}(11)}^2}}{I_H} \times (3) \times 100\%,$$

где $I_{\text{ДСП}(3)}$, $I_{\text{ДСП}(5)}$, $I_{\text{ДСП}(7)}$, $I_{\text{ДСП}(9)}$, $I_{\text{ДСП}(11)}$ – действующие значения значимых нечетных гармоник ДСП.

4. Относительное действующее значение интергармоник и неучтенных гармоник выше 11-й:

$$I'_{\text{ИГ.}\Sigma} = \frac{\sqrt{I_{\text{ДСП}}^2 - I_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}^2 - I_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma}^2}}{I_H} \cdot 100\%.$$

5. Коэффициент суммарных искажений тока дуговой печи определяли по известной формуле как отношение суммарного действующего значения тока высших гармоник к действующему значению тока первой гармоники:

$$K_I = \frac{I_{\text{ВГ.}\Sigma}}{I_{\text{ДСП}(1)}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{I_{\text{ДСП}}^2 - I_{\text{ДСП}(1)}^2 - I_{\text{ДСП}(0)}^2}}{I_{\text{ДСП}(1)}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

6. Относительные действующие значения n -х гармоник определяли следующим образом:

$$I'_{(n)} = \frac{I_{\text{ДСП}(n)}}{I_H} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $I_{\text{ДСП}(n)}$ – действующее значение n -й гармоники, определенное с помощью преобразования Фурье по мгновенному значению тока ДСП (УКП).

Необходимо отметить, что перечисленные параметры рассчитывались индивидуально для каждой фазы ДСП с последующим нахождением среднего арифметического значения. Расчет параметров осуществлялся в среде Matlab – Simulink на основании массивов мгновенных значений токов. Для предотвращения некорректных всплесков среднего коэффициента K_I в моменты включения печных трансформаторов и при работе ДСП на двух дугах была разработана логическая схема, анализирующая пофазное потребление полной мощности дуговой печи на каждом шаге расчета. При уменьшении полной мощности по одной из фаз ниже порогового значения S_H коэффициент K_I для данной фазы исключался из расчета, при этом среднеарифметическая величина рассчитывалась по оставшимся двум значениям.

В качестве примера на **рис. 3** приведены графики изменения гармонических составляющих тока шахтной дуговой сталеплавильной печи ШП-120 (120 т, 85 МВА) ЗАО «Северсталь – Сортотой завод Балаково» за один цикл плавки. Для наглядного отображения основных стадий плавки также был построен график изменения мощности шахтной печи $S_{\text{ШП}}(t)$ (**рис. 3, а**), на котором отмечены исследуемые интервалы времени: ИИ1 – стадия расплавления шихты; ИИ2 – стадия доводки металла с горением дуг на жидкую ванну.

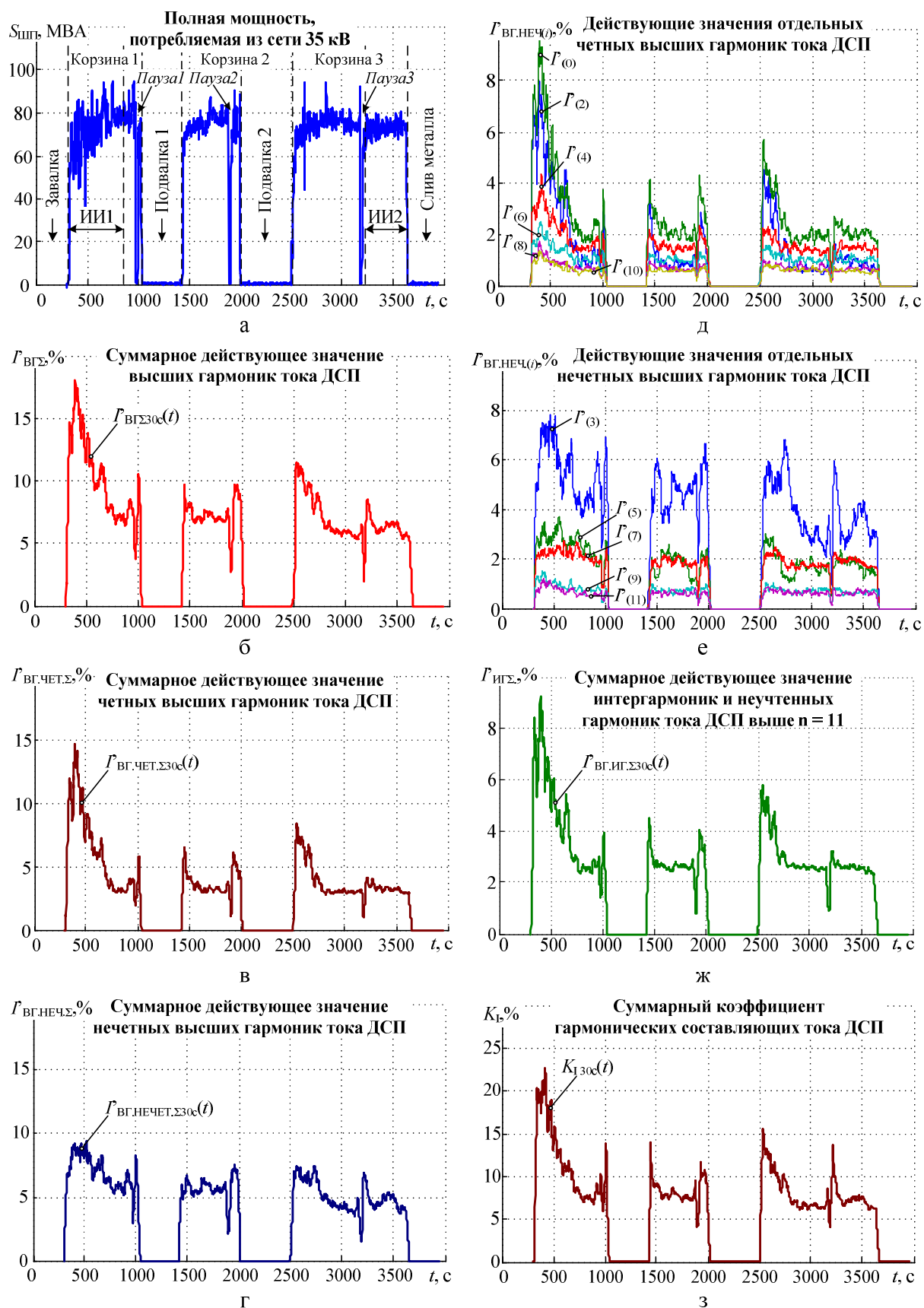


Рис. 3. Изменение гармонических составляющих тока шахтной дуговой сталеплавильной печи ШП-120 (120 т, 85 МВА) ЗАО «Северсталь – Сортной завод Балаково» за один цикл плавки

Необходимо отметить, что все параметры изначально рассчитывались на 20 мс интервалах. После этого с помощью алгоритма скользящего среднего получались сглаженные кривые, отражающие характер изменения усредненных значений гармонических составляющих. Постоянная времени блока усреднения выбиралась разной. Для отображения графиков использовалось значение $T_1 = 30$ с, а для статистической обработки сигналов с целью нахождения максимальных и средних уровней гармоник использовалась величина $T_2 = 3$ с.

Результаты статистической обработки сигналов, содержащие информацию об относительных значениях гармоник и эквивалентных параметрах на основных стадиях плавки для шести различных электросталеплавильных агрегатов, приведены в табл. 2. Анализ средних и максимальных значений коэффициентов производился для стадий расплавления и доводки металла, также для всего времени работы под током за цикл плавки. Анализ гармоник в технологические паузы и в моменты включения печных трансформаторов не производился. Длительность начальной стадии расплавления для всех исследуемых ДСП принималась равной 600 с от момента зажигания дуг. В качестве анализируемой конечной стадии принимался период, когда выполнялся нагрев металла до заданной температуры выпуска. В этом случае длительность стадии была для каждой печи разная.

Графики, приведенные на рис. 3, соответствуют работе 120-тонной шахтной печи с мощностью трансформатора 85 МВА. На данной ШП используется технология предварительного подогрева шихтового материала с помощью отходящих газов. В качестве сырья используется только металлический лом, жидкий чугун не применяется. Загрузка металлошихты осуществляется в три этапа (завалка и две подвалки). Из графиков видно, что относительная величина суммарного действующего значения высших гармоник ($\Gamma_{\text{ВГ.}\Sigma}$) достигает максимального значения на начальной стадии расплавления металла после осуществления завалки шихты. Анализ суммарных действующих значений четных ($\Gamma_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}$) и нечетных ($\Gamma_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma}$) выявил разницу в уровнях сигналов, а также сильные отличия в характере изменения этих параметров во времени. На начальной стадии плавки за первые 600 с

величина $\Gamma_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}$ уменьшилась почти в пять раз относительно сглаженного максимального значения (рис. 3, в), при этом значение $\Gamma_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma}$ снизилось всего в полтора раза (рис. 3, г). В обоих графиках можно увидеть, что после непродолжительных технологических пауз 10–20 с (паузы 1–3 на рис. 3, а) с последующим новым зажиганием дуг уровни гармоник резко увеличиваются. В этом случае требуется определенное время (несколько десятков секунд) для того, чтобы уровни гармоник вернулись к прежним значениям, которые были до прерывания дуг. Это хорошо видно после окончания кратковременной паузы №3 на рис. 3, б-з. Графики изменения n -х гармонических составляющих приведены на рис. 3, д и е. В первоначальный момент при проплавлении колодцев максимальное значение имеет постоянная составляющая $\Gamma_{(0)}$, затем на начальном этапе расплавления возникает равенство между $\Gamma_{(0)}$, $\Gamma_{(2)}$ и $\Gamma_{(3)}$. К концу расплавления первой корзины максимальное значение имеет третья гармоника $\Gamma_{(3)}$. Аналогичная ситуация имеет место для других конечных периодов расплавления для корзин №2 и 3. Необходимо отметить незначительное изменение за цикл плавки действующих значений гармоник $\Gamma_{(7)-(11)}$. График изменения эффективной величины интергармоник $\Gamma_{\text{ИГ}\Sigma}(t)$ (рис. 3, ж) имеет высокую корреляцию с графиком $\Gamma_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}(t)$, что объясняется одинаковой природой возникновения четных и интергармоник. В данном случае степень ослабления вентильного эффекта дуг оказывает основное влияние на характер изменения графиков $\Gamma_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}(t)$ и $\Gamma_{\text{ИГ}\Sigma}(t)$. Изменение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока $K_I(t)$ приведено на рис. 3, з. Как видно из рисунка, кривая $K_I(t)$ имеет более сильные всплески при повторных зажиганиях дуг после непродолжительных пауз, кроме этого, диапазон изменения значений $K_I(t)$ меньше, чем у $\Gamma_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}(t)$ из-за наличия в формуле действующих значений нечетных гармоник.

На основании анализа графиков изменения гармонических составляющих тока мощной ДСП можно сделать вывод о хорошей корреляции параметра $\Gamma_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}$ с технологическими стадиями плавки. Данный параметр может быть использован при построении усовершенствованных систем управления электрическими режимами ДСП, в которых вместо расхода электрической энергии $W_{\text{эл}}$ исполь-

зуется информация о высших гармониках токов дуг. Параметр $\Gamma_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}$ является более предпочтительным для определения окончания периода расплавления шихты по сравнению с остальными коэффициентами, поскольку он имеет наилучшую корреляцию с условиями горения электрических дуг. Для подтверждения этого на **рис. 4** проведен анализ скорости изменения относительных действующих значений токов четных и нечетных гармоник $\Gamma_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}(t)$ и $\Gamma_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma}(t)$ на начальной стадии расплавления шихты (первые 10 мин работы под током). Как видно из рисунка, средняя скорость ослабления четных гармоник $A1 = d\Gamma_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}(t)/dt$ составляет $-0,0162\%I_H/c$, что в четыре раза выше, чем величина $A2 = d\Gamma_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma}(t)/dt$ для нечетных гармоник. Скорости изменений действующих значений $\Gamma_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}(t)$ и $\Gamma_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma}(t)$ были приближенно определены с использованием регрессионных моделей первого порядка. В то же время сглаженная кривая $\Gamma_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma}(t)$ имеет лучшую корреляцию с тепловой постоянной времени дуги, что также может быть использовано для различных задач управления электрическими

режимами, например, для определения уровня вспененного шлака или диагностики состояния технологического процесса на более поздних стадиях плавки, когда уровни четных гармоник являются минимальными и практически не изменяются.

Необходимо отметить, что выявленные особенности изменения гармонических составляющих на ШП-120 (85 МВА) ЗАО «Северсталь – Сортовой завод Балаково» справедливы и для остальных исследуемых ДСП с традиционной технологией ведения плавки (см. **табл. 1**). Исключение составляют ДСП с непрерывной конвейерной подачей шихты в жидкую ванну (Consteel, Danieli) и установки УКП, где дуги большую часть времени плавки работают на жидкую ванну под слоем шлака. В этом случае уровни гармоник зависят от режимов шлакообразования и интенсивности продувки жидкой стадии аргонном. В ряде случаев на УКП в периоды плавки, где осуществляется увеличение интенсивности продувки металла, графики гармоник могут иметь возрастающий характер.

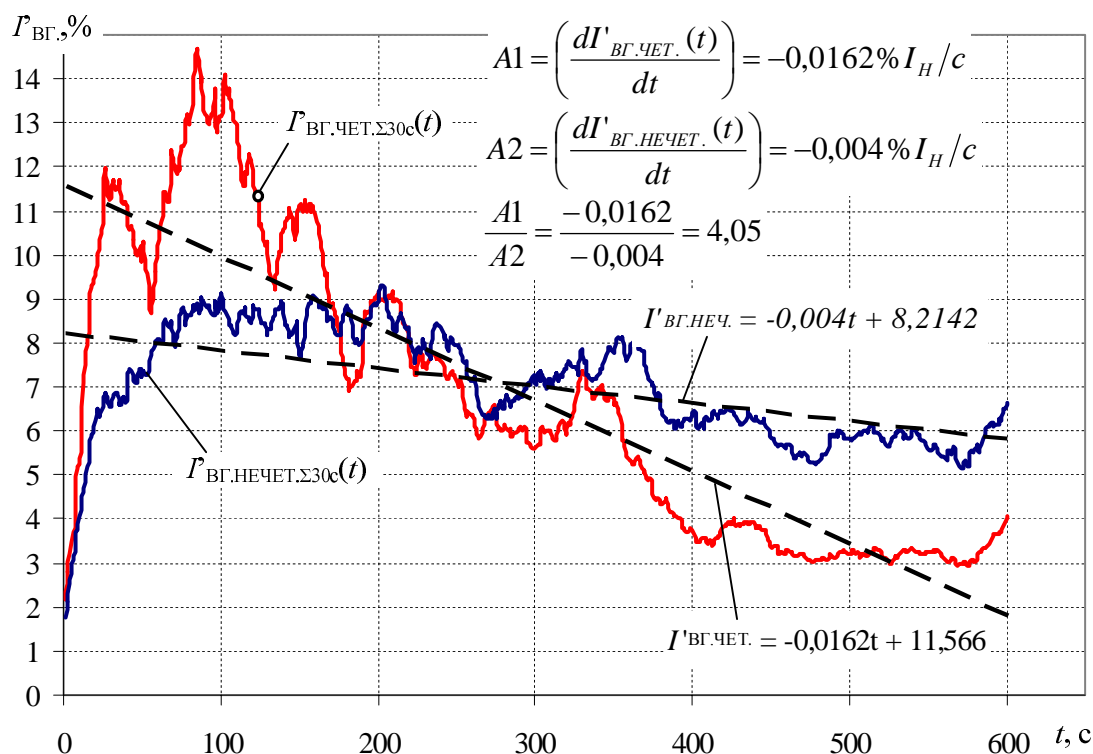


Рис. 4. Сравнительный анализ скоростей изменения относительных действующих значений токов четных и нечетных гармоник шахтной печи на начальной стадии расплавления шихты (первые 10 мин работы под током)

2. Анализ средних и максимальных уровней высших гармоник тока электродуговых установок различной мощности и класса

Аналогичные исследования графиков изменения высших гармоник тока и дополнительных эквивалентных коэффициентов проведены для других электросталеплавильных агрегатов, параметры которых представлены в **табл. 1**. Как было сказано выше, проведен статистический анализ, по результатам которого определены средние и максимальные уровни гармонических составляющих для всего цикла плавки и основных стадий расплавления шихты и доводки жидкой стали (**табл. 2**). Помимо мощной ШП-120 (85 МВА) ЗАО «Северсталь – Сортовой завод Балаково» также проанализированы: 1) мощная ШП-120 (85 МВА) ЧерМК ПАО «Северсталь» (г. Череповец), в которой в процессе плавки используется добавление жидкого чугуна; 2) дуговая печь средней мощности ДСП-10 (10 МВА), функционирующая на сталелитейном заводе ООО «БВК» (г. Челябинск); 3) мощная ДСП-120 (90 МВА), установленная в ЭСПЦ-2 ПАО «АМЗ» (г. Аша), на которой используется технология Consteel; 4) дуговая печь малой мощности ДСП-1,5 (1,25 МВА), функционирующая на Староуткинском минераловатном заводе (ООО «СУМВЗ», п. Староуткинск, Свердловская обл.); 5) мощная УКП 180 тонн (26 МВА), работающая в ЭСПЦ ОАО «ММК» (г. Магнитогорск).

Шахтная печь ШП-120 (85 МВА) ЧерМК ПАО «Северсталь» является аналогом ШП-120 (85 МВА) ЗАО «Северсталь – Сортовой завод Балаково». Основное различие – это шихтовка плавки. На череповецкой печи используется добавление жидкого чугуна после расплавления первой корзины.

Применение жидкого чугуна уменьшает средний уровень гармонических составляющих. Из **табл. 2** видно, что при одинаковом силовом электрооборудовании и конструкции ШП, а также схожих режимах работы дополнительных источников энергии – RCB горелок, средний уровень действующих значений гармоник примерно в 1,5 раза ниже. Объясняется это тем, что жидкий чугун улучшает условия горения электрических дуг за счет увеличения температуры атмосферы внутри печи, а также способствует более интенсивному образованию шлака, экранирующего дуги. Максимальные трехсекундные значения высших гармоник $I'_{\text{ВГ.ΣMAX}}$ отличаются

незначительно, поскольку начальная стадия расплавления шихты протекает в одинаковых условиях как на первой, так и на второй ШП.

Другой мощной ДСП, на которой проводились исследования, была ДСП-120 (90 МВА) ПАО «Ашинский метзавод». Особенностью данной ДСП является использование непрерывной конвейерной подачи шихты в жидкую ванну. В соответствии с технологией холодный старт печи после ремонта подины или длительного простоя осуществляется обычным способом с завалкой и подвалками скрапа с помощью загрузочной бадьи. После окончания первой плавки сливается только часть металла, при этом около 50 т остается в качестве «болота». Последующие плавки выполняются с использованием конвейерной загрузки. Жидкий чугун на данной печи не применяется. В **табл. 2** приведены уровни гармоник для двух ситуаций: 1) для плавки после холодного старта; 2) для плавки с использованием технологии Consteel. В первом случае имеют место большие уровни гармонических составляющих, характерные для мощных ДСП, работающих на чистом ломе. Средние значения гармоник в токе ДСП-120 на начальной стадии плавки больше, чем у ШП-120 ЗАО «Северсталь – Сортовой завод Балаково» из-за отсутствия дополнительного реактора в составе силового электрооборудования печи. Максимальные уровни гармоник примерно одинаковые. При использовании технологии Consteel уровни гармоник в несколько раз ниже и соотносятся с результатами, полученными на установке УКП (26 МВА) ОАО «ММК».

Результаты анализа гармоник токов ДСП средней и малой мощности (ДСП-10 (10 МВА) ООО «БВК» и ДСП-1,5 (1,25 МВА) ООО «СУМВЗ») выявили наибольшие значения эквивалентных показателей $I'_{\text{ВГ}}$, $I'_{\text{ВГ.Н}}$, $I'_{\text{ВГ.Ч}}$ и K_I . Это объясняется большей нестабильностью процесса плавки из-за повышенных значений токов эксплуатационных коротких замыканий, обусловленных более низким индуктивным сопротивлением электрического контура, чем у мощных ДСП. Максимальные уровни гармоник были зафиксированы у ДСП-1,5, где отсутствует дополнительный реактор и используется медленный электропривод перемещения электродов. Также на данной ДСП нет инжекторов углерода и альтернативных источников энергии.

Таблица 2

Изменение гармонического состава токов ДСП и УПК на различных стадиях плавки

Тип и параметры электростале-плавильного агрегата	Анализируемый период плавки		Информация о высших гармониках тока ДСП (УПК), потребляемого из питающей сети														
			Четные гармоники						Нечетные гармоники						Эквивалентные показатели		
			$I'_{(0)}, \%$	$I'_{(2)}, \%$	$I'_{(4)}, \%$	$I'_{(6)}, \%$	$I'_{(8)}, \%$	$I'_{(10)}, \%$	$I'_{(3)}, \%$	$I'_{(5)}, \%$	$I'_{(7)}, \%$	$I'_{(9)}, \%$	$I'_{(11)}, \%$	$I'_{ВГ}, \%$	$I'_{ВГН}, \%$	$I'_{ВГЧ}, \%$	$K_1, \%$
1. Шахтная печь ШП-120 (85 МВА). ЗАО «Северсталь – сортовой завод Балаково». Работа на 100% ломе. $U_{ЛН} = 35$ кВ, $I_H = 1402$ А	Начальная стадия расплавления шихты	Сред.	3,3	5,0	2,8	1,8	1,2	1,0	5,8	3,3	3,9	1,2	1,0	12,4	8,5	7,8	11,9
		Макс.	13,3	15,0	7,2	3,9	2,7	2,3	10,9	5,9	5,6	2,8	1,9	25,2	13,7	22,4	33,9
	Работа дуг на жидкую ванну	Сред.	1,4	2,7	2,0	1,5	0,9	0,8	3,6	1,8	3,7	1,0	0,9	8,2	6,0	4,4	6,7
		Макс.	2,8	4,0	3,4	2,6	1,5	1,4	6,5	2,6	4,9	1,9	1,8	10,4	8,4	5,6	8,8
	Весь цикл плавки	Сред.	2,1	3,6	2,3	1,6	1,0	0,9	4,7	2,6	3,8	1,1	0,9	10,1	7,2	5,8	9,1
		Макс.	13,3	15,0	7,2	3,9	2,7	2,3	10,9	5,9	5,6	2,8	2,1	25,2	13,7	22,4	33,9
2. Шахтная печь ШП-120 (85 МВА). ЧерМК ПАО «Северсталь». Использование 30% жидкого чугуна. $U_{ЛН} = 35$ кВ, $I_H = 1402$ А	Начальная стадия расплавления шихты	Сред.	2,3	2,6	1,2	0,7	0,5	0,4	4,5	2,5	1,0	0,5	0,4	7,4	5,6	4,1	8,7
		Макс.	13,9	11,6	5,6	3,0	2,3	1,6	14,5	4,9	3,1	1,9	1,4	24,6	16,1	19,2	28,3
	Работа дуг на жидкую ванну	Сред.	1,6	1,8	0,9	0,6	0,5	0,4	3,0	3,2	1,2	0,5	0,4	6,0	4,9	2,9	6,8
		Макс.	5,5	7,4	2,5	1,5	1,2	0,9	7,3	4,6	2,1	1,3	1,0	11,9	8,3	9,3	8,5
	Весь цикл плавки	Сред.	1,8	2,1	1,0	0,6	0,5	0,4	4,0	2,3	0,9	0,4	0,3	6,4	5,1	3,3	7,4
		Макс.	13,9	11,6	5,6	3,0	2,4	1,8	14,5	4,9	3,1	1,9	1,9	24,6	16,1	19,2	28,3
3. Дуговая сталеплавильная печь ДСП-120 (90 МВА) ПАО «Ашинский метзавод». $U_{ЛН} = 35$ кВ, $I_H = 1485$ А	Плавка с традиционной технологии (нач. стадия)	Сред.	6,3	5,9	2,5	1,4	1,0	0,7	6,0	2,2	1,3	0,9	0,7	12,9	6,9	10,0	16,7
		Макс.	16,1	12,3	5,0	3,6	2,2	1,7	10,9	4,9	2,6	1,7	1,5	21,8	12,0	20,2	32,9
	Плавка с технологией Consteel (весь цикл)	Сред.	0,7	1,1	0,5	0,3	0,2	0,2	4,1	1,4	0,6	0,7	0,3	5,0	4,6	1,5	5,1
		Макс.	4,1	6,3	2,2	1,0	0,9	0,8	6,2	3,2	1,7	1,3	0,9	10,7	6,9	8,5	14,9
4. Дуговая сталеплавильная печь ДСП-10 (10 МВА) ООО «БВК». $U_{ЛН} = 10$ кВ, $I_H = 577,4$ А	Начальная стадия расплавления шихты	Сред.	5,7	6,9	2,8	1,5	0,9	0,7	5,9	2,6	1,3	0,9	0,6	13,2	6,9	10,5	16,9
		Макс.	23,2	16,7	5,5	3,4	2,3	1,7	12,4	5,7	2,6	2,1	1,5	32,6	14,0	30,3	31,1
	Работа дуг на жидкую ванну	Сред.	1,1	1,5	0,7	0,4	0,3	0,2	1,9	2,1	0,9	0,3	0,3	4,1	3,2	2,3	4,6
		Макс.	5,6	5,6	2,4	1,2	0,9	0,6	5,6	3,9	1,8	0,9	0,7	11,1	6,6	8,3	14,9
	Весь цикл плавки	Сред.	3,1	4,0	1,6	0,9	0,6	0,4	4,1	2,8	1,3	0,6	0,5	8,6	5,5	5,9	10,8
		Макс.	23,2	17,2	6,6	3,4	2,3	1,7	12,4	5,7	2,8	2,3	1,6	32,6	14,0	30,3	36,2
5. Дуговая сталеплавильная печь ДСП-1,5 (1,25 МВА) ООО «СУМВЗ». $U_{ЛН} = 6$ кВ, $I_H = 120,3$ А	Нач. стадия расплавления шихты	Сред.	15,0	21,0	7,2	3,5	2,2	1,6	13,8	6,4	2,8	1,9	1,9	35,0	16,5	29,4	24,0
		Макс.	36,1	40,5	15,3	8,0	5,1	4,2	28,5	12,6	6,0	5,2	4,7	65,3	32,3	59,8	42,0
	Работа дуг на жидкую ванну	Сред.	2,6	4,6	1,4	0,5	0,3	0,2	2,6	3,1	1,0	0,3	1,3	7,6	4,6	5,8	5,8
		Макс.	14,5	13,6	5,9	3,1	1,9	1,7	12,6	6,4	2,2	1,8	2,4	27,1	15,0	21,3	15,9
	Весь цикл плавки	Сред.	5,7	8,3	2,8	1,3	0,8	0,6	5,9	4,1	1,5	0,8	1,3	14,5	8,0	11,4	10,9
		Макс.	36,1	40,5	15,3	8,0	5,1	4,2	28,5	12,6	6,0	5,2	4,7	65,3	32,3	59,8	42,0
6. Установка УПК 180 т. (26 МВА) ОАО «ММК» $U_{ЛН} = 110$ кВ, $I_H = 136,5$ А	Нагрев жидкой ванны в течение всего цикла	Сред.	0,8	1,1	0,5	0,3	0,2	0,1	1,3	0,6	0,3	0,2	0,1	2,4	1,6	1,6	3,4
		Макс.	21,8	28,8	10,7	4,8	2,9	2,5	17,1	7,8	4,2	3,5	2,9	42,2	20,3	39,6	15,6

Комплексный анализ полученных результатов, приведенных в **табл. 2**, показал, что максимальные уровни гармоник ДСП, возникающие на начальных стадиях плавки, могут в 2–4 раза превышать средние значения на том же интервале измерений. Данное обстоятельство является очень важным для выбора параметров фильтрокомпенсирующих цепей СТК, устанавливаемых в системах электроснабжения электросталеплавильных комплексов. В данном случае от уровней токов высших гармоник ДСП и мощности короткого замыкания питающей сети в точке подключения сетевого трансформатора зависят количество фильтров, их номинальная мощность, добротность и частота настройки [21–23]. Также важную роль играет информация об интергармониках. Она необходима для более точного выбора параметров широкополосного фильтра второй гармоники С-типа. Как известно, фильтр С-типа обеспечивает снижение пиков параллельных резонансов токов в эквивалентной частотной характеристике сети и ФКЦ, которые могут усиливать содержание интергармоник в напряжении сети [21–23]. В настоящее время в существующих методиках выбора параметров ФКЦ используется информация только о средних уровнях гармоник на начальной стадии плавки, при этом содержание интергармоник не анализируется. Полученные в данной работе результаты могут служить основой для уточненной методики расчета параметров фильтрокомпенсирующих цепей для ДСП, учитывающей максимальные уровни четных и нечетных гармоник, а также информацию об интергармониках. Также результаты могут быть использованы при уточненном анализе влияния ДСП на качество электроэнергии в точке общего подключения электросталеплавильного комплекса и других электроприемников.

Выводы

1. Достоверная информация о гармоническом составе токов ДСП и УКП играет важную роль при расчете параметров фильтрокомпенсирующих цепей статических компенсаторов реактивной мощности, устанавливаемых в системах электроснабжения электросталеплавильных комплексов. Кроме того, данные о характере изменения высших гармоник тока могут быть использованы для диагностики стадий плавки в ДСП с применением классического технологического процесса, где на начальном этапе плавки осуществляется расплавление твердого шихтового материала, кото-

рый загружают с помощью загрузочной бады.

2. В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе отсутствует комплексный анализ изменения гармонических составляющих тока для современных ДСП различного класса и мощности, в которых осуществляется выплавка жидкого полупродукта с последующей его обработкой в установках УКП. При проектировании СТК исходной информацией для выбора параметров ФКЦ являются усредненные уровни четных и нечетных гармоник, рассчитанные для основной стадии расплавления, при этом не учитываются максимальные значения гармонических составляющих и интергармоники. В литературе отсутствует анализ характера изменения гармоник для ДСП различного класса, который бы позволил выявить закономерности в спектре токов дуг и использовать их для решения задач диагностики стадий плавки.

3. Проведенный анализ графиков изменения гармонических составляющих токов ДСП и УКП широкого класса от мощных 120-тонных печей с трансформатором 90 МВА до печей малой мощности (1,5 т с трансформатором 1,25 МВА) позволил определить закономерности изменения высших гармоник на основных стадиях плавки. Выявлены различные характеры изменения суммарных действующих значений четных и нечетных гармоник. Также показано, что значения четных гармонических составляющих и интергармоник зависят от степени проявления вентильного эффекта дуг на основной стадии расплавления шихты, в то время как нечетные гармоники связаны с изменением тепловой постоянной электрической дуги. В данном случае для диагностики стадий в рамках основного периода расплавления наилучшим образом подходит действующее значение четных гармоник, рассчитанное относительно номинального тока печного трансформатора. На стадии доводки металла, когда вентильный эффект минимален, можно использовать для диагностики технологического процесса и оценки индекса вспененного шлака действующее значение нечетных гармоник.

4. Проведенный анализ средних и максимальных уровней гармонических составляющих для ДСП различного класса показал, что максимальные уровни гармоник на начальной стадии расплавления шихты могут в несколько раз превышать их действующие значения, что необходимо учитывать при выборе параметров фильтров высших гармоник для СТК. Также показано, что в ДСП, в которых применяется заливка жидкого чу-

гуна, средний уровень гармоник ниже, чем в идентичных печах, которые работают на чистом ломе. Кроме этого, впервые приведены результаты исследования гармоник тока для ДСП с непрерывной конвейерной подачей шихты в жидкую ванну. Показано, что гармонический состав в данном случае схож с установками УКП.

Список литературы

1. Николаев А.А. Повышение эффективности работы дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами: монография. Магнитогорск. Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 161 с.
2. Николаев А.А., Корнилов Г.П., Якимов И.А. Исследование режимов работы дуговых сталеплавильных печей в комплексе со статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности. Ч. 1 // Электрометаллургия. 2014. №5. С. 15–22.
3. Анализ различных вариантов построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Тулупов П.Г., Повелица Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 90–100.
4. Electrical Optimization of Superpowerful Arc Furnaces / Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Pekhterev S.V., Povelitsa E.V. // Steel in Translation. 2014. Vol. 44, no. 4, pp. 289–2297. doi:10.3103/S0967091214040135
5. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Вахитов Т.Ю., Якимов И.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №1. С. 76–82.
6. Application of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Voltage Drops Compensation in Factory power Supply System of Metallurgical Enterprise / Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Akay I., Gok Y. // Proceedings of Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Calgary, Canada. IEEE. 2014, pp. 235–41. doi:10.1109/EPEC.2014.18
7. Новосёлов Н.А. Совершенствование методик расчета показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения с дуговыми сталеплавильными печами малой мощности: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2012. 166 с.
8. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2004. 358 с.
9. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace / Chang G.W., Liu Y.J., Huang H.M., Chu S.Y. // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2016. Montreal, Canada. IEEE, pp. 1–4. doi:10.1109/PES.2006.1709471
10. Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He. The Harmonic Detection based on Wavelet Transform and FFT for Electric Arc Furnaces // Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Baoding, China. IEEE. 2009, pp. 408–412. doi:10.1109/ICWAPR.2009.5207486
11. Simulation Research of Harmonics in Electric System of Arc Furnace / Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun // Proceedings of Power System Technology International Conference. IEEE. 2004, vol. 1, pp. 902–906. doi:10.1109/ICPST.2004.1460122
12. Investigation and Mitigation of Harmonics from Electric Arc Furnaces / Ahmed E.E., Abdel-Aziz M., El-Zahab E., Xu W. // Proceedings of Electrical and Computer Engineering Conference. Edmonton, Canada. 1999, vol. 2, pp. 1126–1131. doi:10.1109/CCECE.1999.808213
13. Xiuche L., Guang Y., Wei S. Harmonic Current Detection of Electric Arc Furnace System Based on the Method of Eliminating Zero-sequence Component // Proceedings of Intelligent Computation Technology and Automation International Conference (ICICTA). Shenzhen, Guangdong. IEEE. 2011, pp. 431–433. doi:10.1109/ICICTA.2011.120
14. Xiuche Lu, Xiuqi Li. The Applications of Wavelet Multi-Resolution Algorithm in Harmonic Current Detection of Electric Arc Furnace Short Net // Proceedings of E-Product E-Service and E-Entertainment International conference (ICEEE). Henan, China. IEEE. 2010, pp. 1–5. doi:10.1109/ICEEE.2010.5661007
15. Uz-Logoglu Eda, Salor Ozgul, Ermis Muammer. 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, pp. 2673–2683. doi:10.1109/TIA.2016.2524455
16. 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 Research and Education in Mechatronics (REM) 16th International Conference. Bochum, Germany. IEEE. 2015, pp. 301–308. doi:10.1109/REM.2015.7380411
17. Пат. 2150643 Российская Федерация, МПК F7B3/28 C22B9/20. Способ определения стадий плавения шихты в дуговой сталеплавильной печи / Евсеева Н.В., Яськин В.Н., Токовой О.К., Волкодаев А.Н., Лившиц Д.А., Фрейнд Е.А., Чекунов Г.М., Кочкин В.Н., Зиновьев В.Ю., Речкалов А.В., Фролов В.Г.; заявитель и патентообладатель: ОАО «Челябинский металлургический комбинат «МЕЧЕЛ». № 99118661/02; заявл. 26.08.1999, опубл. 10.06.2000.
18. Пат. 2079982 Российская Федерация, МПК H05B7/148 F27D19/00. Устройство для управления электрическим режимом дуговой электропечи / Архипов В.М., Чернов В.А., Шурыгин М.К., Кирпичников В.П., Исайкин А.Н., Савченко Н.А., Красс М.А., Дрогин В.И., Курлыкин В.Н., Татаров А.П., Ясненко А.А.; заявитель и патентообладатель: АОО «Красный Октябрь»; заявл. 18.07.1995, опубл. 20.05.1997.
19. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.
20. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2009.
21. Design, Implementation, and Operation of a New C-Type 2nd Harmonic Filter for Electric Arc and Ladle Furnaces / Cem Özgür Gerçek, Muammer Ermis, Arif Ertas, Kemal Nadir Kose // IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 47. Iss. 4, pp. 1545–1557. doi:10.1109/TIA.2011.2155020
22. Обоснование выбора мощности фильтрокомпенсирующего устройства дуговой сталеплавильной печи / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Урманова Ф.Ф., Зайцев А.С., Скаун С.В. // Главный энергетик. 2015. №8. С. 49–56.
23. Фильтрокомпенсирующие цепи статических тиристорных компенсаторов / Ольшванг М.В., Рычков Е.В., Ананишвили К.Е., Чуприков В.С. // Электричество. 1990. №1. С. 23–29.

Материал поступил в редакцию 29.07.16.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTRIC ARC CURRENT HARMONICS IN ELECTRIC ARC FURNACES WITH DIFFERENT POWER CHARACTERISTICS

Aleksandr A. Nikolaev – Ph.D. (Eng.), Head of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID: orcid.org/0000-0001-5014-4852

Jean Jacques Rousseau – Professor of the Department of Electrical Engineering and Industrial Informatics Institute of Technology. Jean Monnet University, Saint Etienne, France. E-mail: jean.jacques.rousseau@univ-st-etienne.fr

Vincent Szymanski – Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Industrial Informatics Institute of Technology. Jean Monnet University, Saint Etienne, France. E-mail: szvi9777@univ-st-etienne.fr

Platon G. Tulupov – Master's student of the Department of Automated Electric Drives and Mechatronics Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tulupov.pg@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): The authors conducted a series of experiments aimed at studying the current harmonics of electric arc furnaces (EAF) with different power characteristics and of different types that are functioning at a number of steel making sites across Russia. **Objectives:** The study aims to provide a comprehensive analysis of the changing electric arc high-order current harmonics, identify the patterns and define the mean and maximal levels of harmonics for each type of furnace. **Methods Applied:** The research was based on the range of instantaneous current values registered with high-speed multichannel electrical signal recorders. The data processing was realized with the Simulink application, a part of the MATLAB package. The basic coefficients of EAF current harmonics were calculated using the default spectral analysis methods and the developed signal processing algorithms. **Findings:** The study helped identify the effect of process factors and power equipment parameters on the levels of harmonics at different EAF process stages. The authors came to the conclusion that it is crucial to consider the maximal levels of important harmonics when choosing the parameters of harmonic filters for static var compensators. The authors analysed and compared the change rates of the total root-mean-square values of even harmonics vs. odd harmonics. The comparison helped identify an important trend, which is that the attenuation rate of even harmonics is several times higher compared with the attenuation rate of odd harmonics. The analysis justifies the use of the root-mean-square value of even harmonics for process diagnostics in conventional EAFs. **Originality:** This is original research as it offers the first comprehensive analysis of the change pattern of high-order current harmonics in a broad range of EAFs, which, apart from conventional electric arc furnaces and classical ladle furnaces, includes furnaces with continuous scrap feed and shaft furnaces with the burden pre-heating system. **Practical Relevance:** The research findings offer a great contribution to the field of electrical engineering of arc furnaces and may be useful when designing the parameters of static var compensators which

are a part of EAF power supply systems. The patterns identified may also be applied for solving the EAF process diagnostics tasks, as well as for designing advanced EAF power control systems.

Keywords: Electric arc furnace, ladle furnace, current harmonics, electrical power quality, static var compensator, reactive power compensation, high-order harmonics filter, electrode positioning control system, EAF process diagnostics.

References

1. Nikolaev A.A. *Povyshenie effektivnosti raboty dugovyh staleplavil'nykh pechei i ustanovok kovsh-pech' za schet primeneniya usovershenstvovannykh algoritmov upravleniya elektricheskimi rezhimami: monografiya* [Improving the performance of electrical arc furnaces and ladle furnaces through the application of advanced power control algorithms: Monograph]. Magnitogorsk: the Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2015, 161 p. (In Russ.)
2. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Yakimov I.A. Study of operating modes of electric arc furnaces with static var compensators. Part 1. *Elektrometallurgiya*. [Electrometallurgy], 2014, no.5, pp. 15–22. (In Russ.)
3. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Tulupov P.G., Povelitsa E.V. Study of different design options of electrode positioning control systems for electric arc furnaces and ladle furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 2, pp. 90–100. (In Russ.)
4. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Pekhterev S.V., Povelitsa E.V. Electrical Optimization of Superpowerful Arc Furnaces. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44, no. 4, pp. 289–2297. doi:10.3103/S0967091214040135
5. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R., Vakhitov T.Yu., Yakimov I.A. Some features of mathematical modelling of an electric arc furnace as an electrotechnical complex. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no.1, pp. 76–82. (In Russ.)
6. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Akay I., Gok Y. Application of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Voltage Drops Compensation in the Factory Power Supply System of a Metallurgical Enterprise. *Proceedings of*

- Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Calgary, Canada. IEEE, 2014, pp. 235–41. doi:10.1109/EPEC.2014.18
7. Novoselov N.A. *Sovershenstvovanie metodik rascheta pokazateley kachestva electroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya s dugovimi staleplavil'nymi pechami maloy moshnosti. Diss. kand tekhn. nauk* [Improvement of electrical power quality calculation methods for power supply systems of low-power electric arc furnaces. PhD Dissertation]. Magnitogorsk, 2012, 166 p. (In Russ.)
8. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii* [Higher harmonics in industrial power supply systems]. Moscow: Energoatomizdat, 2004, 358 p. (In Russ.)
9. Chang G.W., Liu Y.J., Huang H.M., Chu S.Y. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace. *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 2016. Montreal, Canada. IEEE, pp. 1–4. doi:10.1109/PES.2006.1709471
10. Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He. The Harmonic Detection based on Wavelet Transform and FFT for Electric Arc Furnaces. *Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*. Baoding, China. IEEE, 2009, pp. 408–412. doi:10.1109/ICWAPR.2009.5207486
11. Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun. Simulation Research of Harmonics in Electric System of Arc Furnace. *Proceedings of Power System Technology International Conference*. IEEE, 2004, vol. 1, pp. 902–906. doi:10.1109/ICPST.2004.1460122
12. Ahmed E.E., Abdel-Aziz M., El-Zahab E., Xu W. Investigation and Mitigation of Harmonics from Electric Arc Furnaces. *Proceedings of Electrical and Computer Engineering Conference*. Edmonton, Canada. 1999, vol. 2, pp. 1126–1131. doi:10.1109/CCECE.1999.808213
13. Xiuche L., Guang Y., Wei S. Harmonic Current Detection of Electric Arc Furnace System Based on the Method of Eliminating Zero-sequence Component. *Proceedings of Intelligent Computation Technology and Automation International Conference (ICICTA)*. Shenzhen, Guangdong. IEEE, 2011, pp. 431–433. doi:10.1109/ICICTA.2011.120
14. Xiuche Lu, Xiuqi Li. The Applications of Wavelet Multi-Resolution Algorithm in Harmonic Current Detection of Electric Arc Furnace Short Net. *Proceedings of E-Product E-Service and E-Entertainment International conference (ICEEE)*. Henan, China. IEEE, 2010, pp. 1–5. doi:10.1109/ICEEE.2010.5661007
15. Uz-Logoglu Eda, Salor Ozgul, Ermis Muammer. 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, pp. 2673–2683. doi:10.1109/TIA.2016.2524455
16. 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 Research and Education in Mechatronics (REM) 16th International Conference*. Bochum, Germany. IEEE, 2015, pp. 301–308. doi:10.1109/REM.2015.7380411
17. Evseeva N.V., Yas'kin V.N., Tokovoy O.K., Volkodaev A.N., Livshits D.A., Freynd E.A., Chekunov G.M., Kochkin V.N., Zinov'ev V.Yu., Rechkalov A.V., Frolov V.G. *Sposob opredeleniya stadii plavleniya shihty v dugovoy staleplavil'noi pechi* [The method of heating stage diagnostic in an electric arc furnace]. Patent RF, no. 2150643, 2000.
18. Arkhipov V.M., Chernov V.A., Shurygin M.K., Kirpichenkov V.P., Isaykin A.N., Savchenko N.A., Krass M.A., Drogin V.I., Kurlykin V.N., Tatarov A.P., Yasinenko A.A. *Ustroystvo dlya upravleniya elektricheskimi rezhimami dugovoy elektropечи* [The device for control of the electrical regime of an electric arc furnace]. Patent RF, no. 2079982, 1997.
19. Sventchanskiy A.D. *Elektricheskie promyshlennyye pechi*. [Industrial Electric Furnaces]. Moscow: Energoizdat, 1981, 296 p.
20. Bowman B., Krüger K. *Arc Furnace Physics*. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2009.
21. Özgür Gerçek, Muammer Ermis, Arif Ertas, Kemal Nadir Kose. Design, Implementation, and Operation of a New C-Type 2nd Harmonic Filter for Electric Arc and Ladle Furnaces. *Cem. IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, Iss. 4, pp. 1545–1557. doi:10.1109/TIA.2011.2155020
22. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Urmanova F.F., Zaytsev A.S., Skakun S.V. The reasoning behind the choice of power for the static var compensator to be used in an electric arc furnace. *Glavnyi energetik* [Chief electrician]. 2015, no. 8, pp. 49–56. (In Russ.)
23. Ol'shvang M.V., Rychkov E.V., Ananiashvili K.E., Chuprikov V.S. Harmonic filters in static var compensators. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1990, no. 1, pp. 23–29. (In Russ.)

Received 29/07/16

Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / Николаев А.А., Руссо Ж.-Ж., Сцымански В., Тулупов П.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. С. 106–120. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120

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* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 106–120. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120