

АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ДУГ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич, С.С. Рыжевол

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

В рамках данного исследования выполнен анализ зависимости относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник токов и напряжений электрических дуг дуговой сталеплавильной печи от величины тепловой постоянной времени дуги, вентильного эффекта, а также несимметричных режимов. С использованием математической модели электрического контура печи теоретически обоснована эффективность применения информации о чётных гармониках для решения задач диагностики стадии плавления шихты на начальной стадии расплавления и нечётных гармониках на стадии доводки. На базе полученных в ходе математического моделирования результатов сформированы рекомендации по формированию структуры блока диагностики стадии плавления металлошихты в составе системы управления электрическим режимом в зависимости от типа электросталеплавильного агрегата. Полученные результаты обладают потенциалом к применению в исследованиях, направленных на разработку усовершенствованных алгоритмов управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь с целью снижения энергозатрат на производство жидкой стали.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, чётные гармоники, нечётные гармоники, напряжение электрической дуги, ток электрической дуги, вентильный эффект, тепловая постоянная времени дуги, несимметричные режимы, электрический режим, система управления.

Введение

В настоящее время в современной металлургической промышленности наблюдается активная тенденция по увеличению доли жидкой стали, полученной с использованием дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП). Это обусловлено высокими показателями качества готовой продукции, а также высокими технико-экономическими показателями работы, достигаемыми в процессе эксплуатации печных агрегатов данного типа. Несмотря на очевидные преимущества, ДСП остаётся одним из самых ёмких потребителей электроэнергии, поскольку удельная мощность печного трансформатора для современных агрегатов достигает величины 0,7–1 МВА/т при номинальной массе выплавляемой стали от 100 до 250 т [1]. В связи с этим особую актуальность приобретает задача оптимизации работы ДСП с целью снижения производственных издержек путём сокращения затрат электроэнергии в процессе плавления. Существует несколько путей решения данной задачи, одним из которых является совершенствование систем управления электрическими режимами работы печи. Как правило, все существующие системы управления электрическим режимом ДСП обладают двухуровневой структурой. На втором уровне в соответствии с профилем плавки формируется задание ступени печного трансформатора $N_{ТР}$, реактора N_R (при наличии) и номера рабочей кривой $N_{РК}$. При этом критерием перехода с одной стадии плавки на другую в подавляющем большинстве случаев является

показатель удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$. Сочетания $N_{ТР}$ и N_R определяют форму электрических, рабочих и технологических характеристик, в том числе отражающих зависимость мощности электрической дуги P_D от тока дуги I_D , тем самым позволяя регулировать объём электрической энергии, вводимой в печь. В свою очередь, параметр $N_{РК}$ определяет текущий набор уставок параметра регулирования в системе управления первого уровня, определяя рабочую точку на электрической характеристике $P_D = f(I_D)$ и обеспечивая её поддержание за счёт управления гидравлическим приводом перемещения электродов [2]. Аналогичным образом контролируются значения коэффициента износа футеровки $KИФ = f(P_D, I_D)$ и коэффициента интенсивности нагрева $KИН = f(P_D, I_D)$.

Подавляющее большинство современных систем управления электрическим режимом, таких как ARCOS, Simelt (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия), HI-REG Plus, Q-REG (Danieli, Италия), E.M.P.E.R.E (Amec Spie, Франция), DECTEQ (Ferrottron, Германия) и Digit Arc (AMI, Мексика), обладают потенциалом к внедрению усовершенствованных алгоритмов управления как для системы второго, так и для системы первого уровня.

В рамках данного исследования рассматривается усовершенствованный алгоритм управления электрическим режимом ДСП в составе системы второго уровня, в основе которого лежит альтернативный способ диагностики стадии плавления металлошихты с использованием информации о

высших гармониках токов и напряжений электрических дуг. Основная цель применения данного алгоритма – обеспечение своевременных переключений сочетаний N_{TR} , N_R и N_{PK} в соответствии с реальной технологической стадией плавления металлошихты в ДСП, что обеспечивает снижение затрат электроэнергии за цикл плавки. В основе данного алгоритма лежит раздельный анализ чётных и нечётных гармоник токов и напряжений дуг. Отметим, что главной задачей исследований поведения чётных и нечётных гармоник является выявление зависимостей между их уровнем в составе сигнала тока и напряжения дуги и технологической стадией плавления металлошихты.

Теоретические основы применения анализа гармонического состава напряжения электрической дуги для системы диагностики стадии плавления металлошихты

Как отмечалось ранее, подавляющее большинство современных систем управления электрическим режимом обладают рядом недостатков, которые открывают пути к внедрению усовершенствованных алгоритмов. В работе [2] был прове-

дён подробный анализ наиболее распространённых в России и за рубежом систем, в ходе которого был сформирован перечень критериев, на основе которых можно судить об обеспечении той или иной системой энергоэффективного управления печным агрегатом. Также в ходе анализа было установлено, что ни одна из существующих систем управления электрическим режимом не удовлетворяет критерию наличия возможности диагностики стадий плавки в ДСП (оценка стабильности нагрева стали в УКП) и интеллектуального управления процессом переключения ступеней РПН трансформатора N_{TR} , реактора N_R и изменения рабочих кривых N_{PK} . Это связано с тем, что во всех рассматриваемых системах использовался профиль плавки, в структуре которого заложен переход с одного сочетания N_{TR} , N_R и N_{PK} на другое по мере достижения определённых критических значений удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$. В качестве поясняющего примера в таблице приведена структура профиля плавки для системы ARCOS, функциональная схема которой представлена на рис. 1.

Основной недостаток использования величины $W_{уд}$ в составе профиля плавки заключается в

Структура профиля плавки в системе управления электрическим режимом ARCOS (Siemens VA1, Primetals Technologies)

Шаг	Корзина 1				Корзина 2				Корзина 3			
	$W_{уд}$	N_{TR}	N_R	N_{PK}	$W_{уд}$	N_{TR}	N_R	N_{PK}	$W_{уд}$	N_{TR}	N_R	N_{PK}
1	$W_{уд11}$	N_{TR11}	N_{P11}	N_{PK11}	$W_{уд21}$	N_{TR21}	N_{P21}	N_{PK21}	$W_{уд31}$	N_{TR31}	N_{P31}	N_{PK31}
2	$W_{уд12}$	N_{TR12}	N_{P12}	N_{PK12}	$W_{уд22}$	N_{TR22}	N_{P22}	N_{PK22}	$W_{уд32}$	N_{TR32}	N_{P32}	N_{PK32}
3	$W_{уд13}$	N_{TR13}	N_{P13}	N_{PK13}	$W_{уд23}$	N_{TR23}	N_{P23}	N_{PK23}	$W_{уд33}$	N_{TR33}	N_{P33}	N_{PK33}
4	$W_{уд14}$	N_{TR14}	N_{P14}	N_{PK14}	$W_{уд24}$	N_{TR24}	N_{P24}	N_{PK24}	$W_{уд34}$	N_{TR34}	N_{P34}	N_{PK34}
5	$W_{уд15}$	N_{TR15}	N_{P15}	N_{PK15}	$W_{уд25}$	N_{TR25}	N_{P25}	N_{PK25}	$W_{уд35}$	N_{TR35}	N_{P35}	N_{PK35}
6	$W_{уд16}$	N_{TR16}	N_{P16}	N_{PK16}	$W_{уд26}$	N_{TR26}	N_{P26}	N_{PK26}	$W_{уд36}$	N_{TR36}	N_{P36}	N_{PK36}

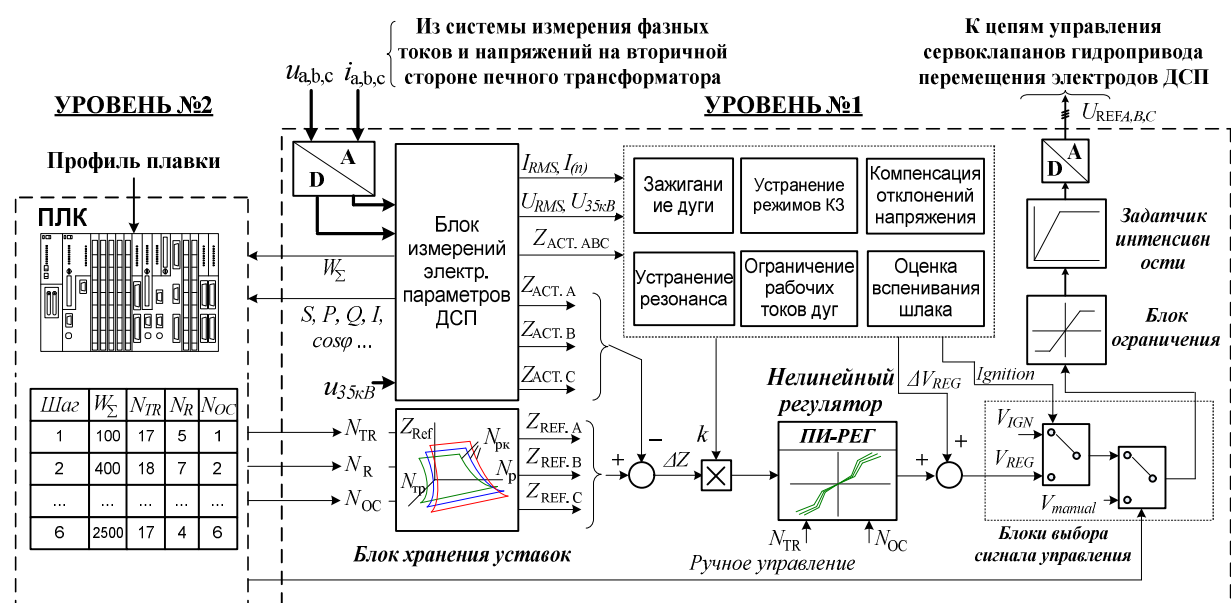


Рис. 1. Функциональная схема системы управления электрическими режимами ДСП ARCOS (Siemens, Германия)

том, что данный параметр не имеет прямой связи с реальными технологическими процессами, протекающими внутри ванны печи. Определение граничных значений $W_{уд}$ в составе профиля осуществляется на основе количественной, а не качественной оценки лома, используемого в завалке и подвалках. По различным причинам состав металлошихты меняется от плавки к плавке, вследствие чего достоверно оценить стадию плавки основываясь лишь на данных о количестве лома и введенной энергии достаточно сложно. Так, для одинакового количества металлошихты с ломом и скрапом по достижении одного и того же граничного значения $W_{уд}$, фактические стадии расплавления могут быть неодинаковыми: в одном случае уже может идти основная стадия расплавления, в другом – только завершаться стадия проплавления колодцев. Таким образом, разработка усовершенствованного профиля плавки, обеспечивающего адекватное переключение сочетаний $N_{тр}$, N_p и $N_{рк}$ в соответствии с текущей стадией плавления, является актуальной задачей, решение которой позволит повысить энергоэффективность работы ДСП.

Основной проблемой на пути к решению данной задачи является выбор критерия, в соответствии с которым будут производиться переключения. В качестве решения данной проблемы, в работе [3] было предложено в качестве основного критерия использовать суммарный коэффициент гармонических составляющих тока дуги K_I . В основе идеи применения данного критерия лежат физические свойства электрической дуги, речь о которых пойдет далее.

Электрическая дуга в математическом выражении может быть представлена дифференциальным уравнением мгновенной проводимости (уравнением Касси) [4]:

$$\Theta_D(t) \frac{dg_D(t)}{dt} = \left(\frac{u_D^2(t)}{E_D^2(t)} - 1 \right) g_D(t) dt, \quad (1)$$

где $g_D(t)$ – мгновенное значение проводимости электрической дуги; Θ_D – тепловая постоянная времени электрической дуги; $E_D(t)$ – противоЭДС электрической дуги.

ПротивоЭДС электрической дуги, в свою очередь, определяется по следующей формуле

$$E_D = \begin{cases} K_{вэ}(\alpha + \beta L_D), & i_D(t) > 0; \\ \alpha + \beta L_D, & i_D(t) < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где α – падение напряжения в приэлектродных областях; β – градиент напряжения дугового столба; L_D – длина электрической дуги; $K_{вэ}$ – коэффициент вентильного эффекта.

Тепловая постоянная времени электрической дуги Θ_D и $K_{вэ}$ являются параметрами, наиболее тесно связанными со стадией плавки. Величина Θ_D по мере расплавления твердой шихты и образования жидкой фазы, экранированной вспененным

шлаком, постепенно изменяется в диапазоне от 250 до 3500 мкс. Параметр $K_{вэ}$, определяющий отношение величины противоЭДС дуги в момент прохождения положительной полуволны мгновенного значения тока дуги к величине противоЭДС дуги в момент прохождения отрицательной полуволны, по мере проплавления изменяется в диапазоне от 1,2 до 1 [5]:

$$K_{вэ} = \frac{E_{D+}}{E_{D-}} = \frac{I_{mD+}}{I_{mD-}}, \quad (3)$$

где E_{D+} , E_{D-} – противоЭДС дуги в период прохождения положительной и отрицательной полуволны тока дуги соответственно; I_{mD+} , I_{mD-} – амплитуда положительной и отрицательной полуволны сигнала мгновенного значения тока дуги соответственно.

Таким образом, идея применения коэффициента несинусоидальности кривой тока дуги K_I для решения задачи диагностики стадии плавления шихты основана на том, что по мере роста величины Θ_D и уменьшения $K_{вэ}$ доля высших гармоник в составе тока электрической дуги снижается.

Данная идея получила своё развитие в исследовании [6], где был проведён подробный анализ гармонического состава сигнала тока электрической дуги на печных агрегатах различного класса и мощности. В результате данного исследования было предложено использовать для решения задач диагностики стадии плавки раздельный анализ по относительным действующим значениям чётных $I'_{дв.чѐт.г}$ и нечётных $I'_{дв.нечѐт.г}$ гармоник. Экспериментальные исследования показали, что скорость ослабления чётных гармоник в начале приближительно в четыре раза выше, чем нечётных. Вследствие этого использование чётных гармоник предпочтительнее использовать для диагностики стадии в начале плавки, а нечётных гармоник – в конце.

Параллельно исследованиям в области, посвящённой анализу гармонического состава токов дуг, развивались исследования в области применения гармонического состава напряжений дуг для решения задач диагностики стадии плавки. В исследовании [7] было предложено использовать в аналогичных целях коэффициент несинусоидальности кривой напряжения дуги K_U . Основным преимуществом использования K_U является меньшая зависимость данного параметра от колебаний длины электрической дуги и несимметричных режимов, вследствие чего снижается дисперсия результирующего сигнала и не возникает необходимости использования фильтров сигнала с большими постоянными времени, приводящих к искажениям и невозможности диагностировать непродолжительные стадии.

Отметим, что концепция раздельного анализа чётных и нечётных гармоник также применима и для сигнала напряжения дуги, что было обоснова-

но в работе [6]. В данном исследовании также нашли своё экспериментальное подтверждение утверждения о меньшей зависимости гармонического состава напряжения дуги от длины дуги и несимметричных режимов.

Помимо преимуществ, которые предоставляет применение анализа гармонического состава напряжений дуг, существуют определённые недостатки. Величину мгновенного значения напряжения дуги проблематично измерить напрямую, вследствие этого необходимо прибегать к косвенному расчёту, для выполнения которого необходимы большие вычислительные мощности и точное определение параметров схемы замещения [8]. Кроме того, при относительно низкой интенсивности возмущающих воздействий и режимах горения дуг, близких к симметричным, выше обозначенные преимущества нивелируются.

Таким образом, как гармонический анализ тока, так и гармонический состав напряжения дуги могут быть использованы в качестве показателя для применения в системе диагностики стадии плавления шихты. Несмотря на достаточно большой опыт работы в данном направлении, остаётся неизученным вопрос, связанный с влиянием тепловой постоянной времени дуги Θ_d , коэффициента вентильного эффекта $K_{ВЭ}$, длины электрической дуги L_d и коэффициента несимметрии токов дуг K_{21} на чётные и нечётные гармоники в отдельности. Подобный анализ проводился в исследовании [7], но только для величин K_I и K_U . Кроме того, ранее анализ в части чётных и нечётных гармоник преимущественно проводился на основе экспериментальных данных и нуждается в унификации на математической модели.

Анализ относительных действующих значений суммарных, чётных и нечётных гармоник токов и напряжений электрических дуг на основе математической модели

Для проведения анализа характера изменения чётных и нечётных гармоник тока и напряжения дуги была использована математическая модель электрического контура ДСП, разработка которой детально описана в работах [9–12]. В качестве объекта исследования выбрана дуговая сталеплавильная печь шахтного типа с мощностью печного трансформатора 85 МВА со следующими основными параметрами: ступень печного трансформатора $N_{ТР} = 8$, линейное напряжение на первичной стороне $U_{1Л} = 35$ кВ; линейное напряжение на вторичной стороне $U_{2Л} = 847$ В; коэффициент трансформации ПТ $K_T = 41,322$; активное сопротивление питающей сети, приведённое к первичной стороне $R_S = 0,135$ Ом; индуктивность питающей сети, приведённая к первичной стороне $L_S = 4,302$ мГн; активное сопротивление обмотки ПТ, приведённое к первичной стороне $R_{ТР1-3} = 0,0994$ Ом; индуктивное сопротивление обмотки ПТ, приведённая к первичной стороне $L_{ТР1-3} = 7,534$ мГн; активное сопротивление участка короткой сети $R_{КС1} = 0,303$ мОм; $R_{КС2} = 0,240$ мОм; $R_{КС3} = 0,286$ мОм; индуктивное сопротивление участка короткой сети $L_{КС1} = 8,929 \cdot 10^{-6}$ Гн; $L_{КС2} = 8,766 \cdot 10^{-6}$ Гн; $L_{КС3} = 8,703 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Для расчёта сигналов относительного действующего значения чётных и нечётных гармоник токов и напряжений дуг использована вспомогательная математическая модель, реализованная в среде MATLAB Simulink, функциональная схема которой представлена на рис. 2. В качестве входных

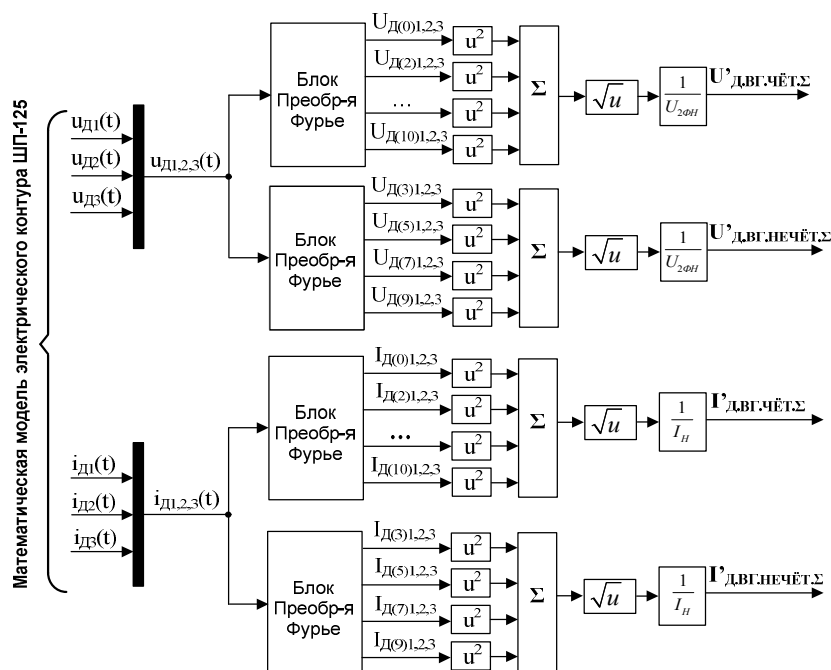


Рис. 2. Функциональная схема математической модели для расчёта относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник токов и напряжений дуг

параметров для данной модели используются сигналы мгновенных значений токов $i_{д1}(t)$, $i_{д2}(t)$, $i_{д3}(t)$ и напряжений дуг $u_{д1}(t)$, $u_{д2}(t)$, $u_{д3}(t)$, формируемых в математической модели электрического контура.

В основу данной функциональной схемы заложены следующие расчётные формулы относительного действующего значения суммарных чётных и нечётных гармоник тока и напряжения дуги:

$$I'_{д.вг.чѐтѐ} = \frac{\sqrt{I_{д(0)}^2 + I_{д(2)}^2 + I_{д(4)}^2 + I_{д(6)}^2 + I_{д(8)}^2 + I_{д(10)}^2}}{I_H} \cdot 100\%; \quad (6)$$

$$U'_{д.вг.чѐтѐ} = \frac{\sqrt{U_{д(0)}^2 + U_{д(2)}^2 + U_{д(4)}^2 + U_{д(6)}^2 + U_{д(8)}^2 + U_{д(10)}^2}}{U_{2фн}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

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 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 гармоник напряжения электрической дуги соответственно; I_H – номинальный ток печного трансформатора на текущей ступени РПН; $U_{2н}$ – номинальное фазное напряжение печного трансформатора на текущей ступени РПН:

$$I'_{д.вг.нечѐтѐ} = \frac{\sqrt{I_{д(3)}^2 + I_{д(5)}^2 + I_{д(7)}^2 + I_{д(9)}^2}}{I_H} \cdot 100\%; \quad (8)$$

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

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

На математической модели, функциональная схема которой представлена на рис. 3, было выполнено исследование влияния тепловой постоянной времени дуги, вентильного эффекта, а также несимметричных режимов на чётные и нечётные гармоники токов и напряжений дуг. При проведении исследований получены следующие осциллограммы:

1) средние по трѐм фазам значения величин $I'_{д.вг.чѐтѐ}$, $I'_{д.вг.нечѐтѐ}$, $U'_{д.вг.чѐтѐ}$, $U'_{д.вг.нечѐтѐ}$ при ступенчатом изменении величины Θ_d от 500 до 3500 мкс с шагом 500 мкс, постоянной величине $K_{вѐ} = 1,2$ и одинаковой длине электрической дуги в трѐх фазах, равной 400 мм;

2) средние по трѐм фазам значениям величин $I'_{д.вг.чѐтѐ}$, $I'_{д.вг.нечѐтѐ}$, $U'_{д.вг.чѐтѐ}$, $U'_{д.вг.нечѐтѐ}$ при ступенчатом изменении величины $K_{вѐ}$ от 1,2 до 1,00 с шагом 0,05, постоянной величине $\Theta_d = 500$ мкс и одинаковой длине электрической дуги в трѐх фазах, равной 400 мм;

3) значения $I'_{д.вг.чѐтѐ}$, $I'_{д.вг.нечѐтѐ}$, $U'_{д.вг.чѐтѐ}$, $U'_{д.вг.нечѐтѐ}$ для каждой из трѐх фаз в отдельности при ступенчатом изменении величины длины электрической дуги в фазе «3» от 200 до 700 мм при постоянной длине дуги в фазах «1» и «2», равной 100 мм.

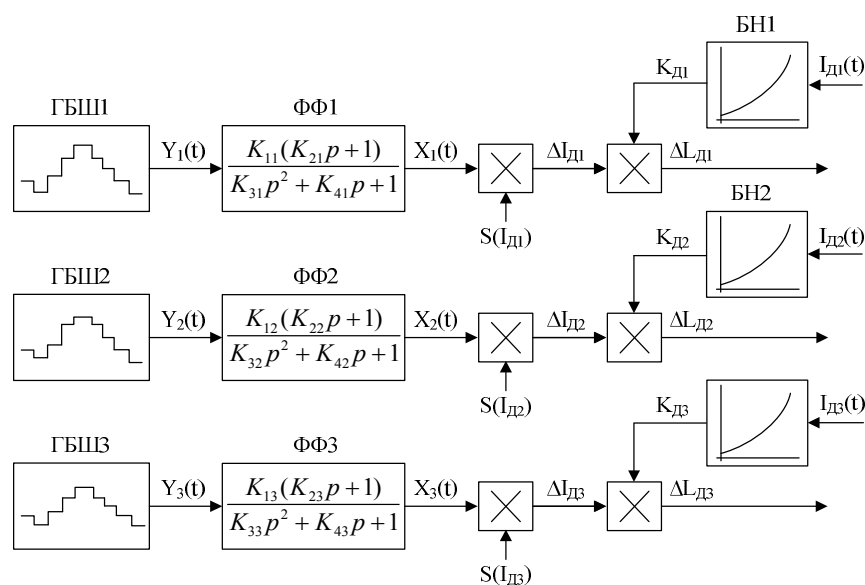


Рис. 3. Функциональная схема блока формирования случайных возмущений электрических дуг

Осциллограммы, полученные в результате моделирования, представлены на рис. 4–7. Отметим, что для достижения в процессе моделирования режимов работы, максимально приближенных к реальным, в модели была использована система формирования случайных возмущений по длине электрической дуги по аналогии с той, что была разработана в [13]. Функциональная схема данной системы приведена на рис. 3.

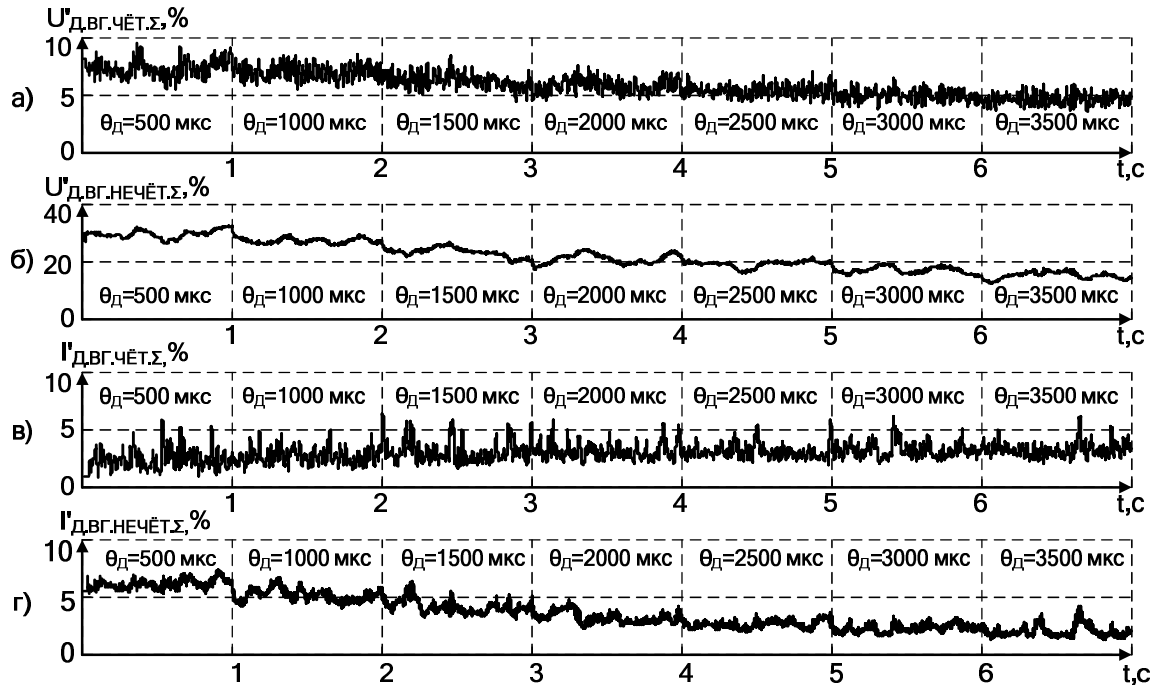


Рис. 4. Осциллограммы средних по 3 фазам относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник: а, б – напряжения дуги; в, г – тока дуги при ступенчатом изменении величины $\theta_{д}$ в симметричном режиме

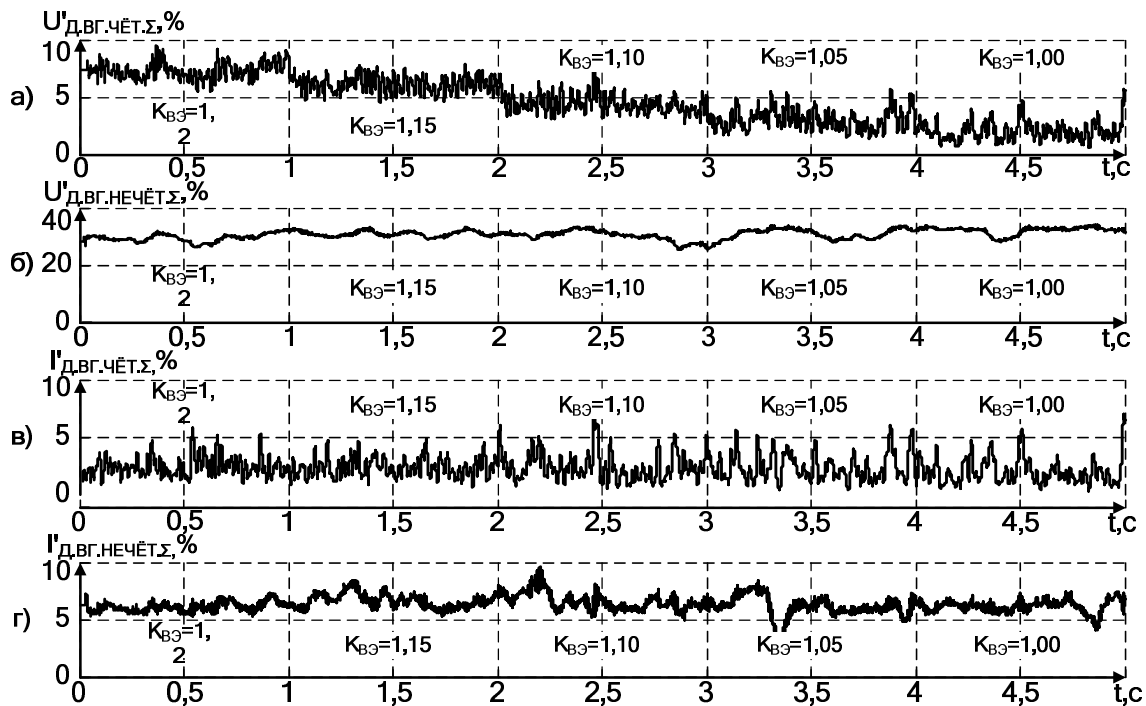


Рис. 5. Осциллограммы средних по 3 фазам относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник: а, б – напряжения дуги; в, г – тока дуги при ступенчатом изменении величины $K_{вэ}$ в симметричном режиме

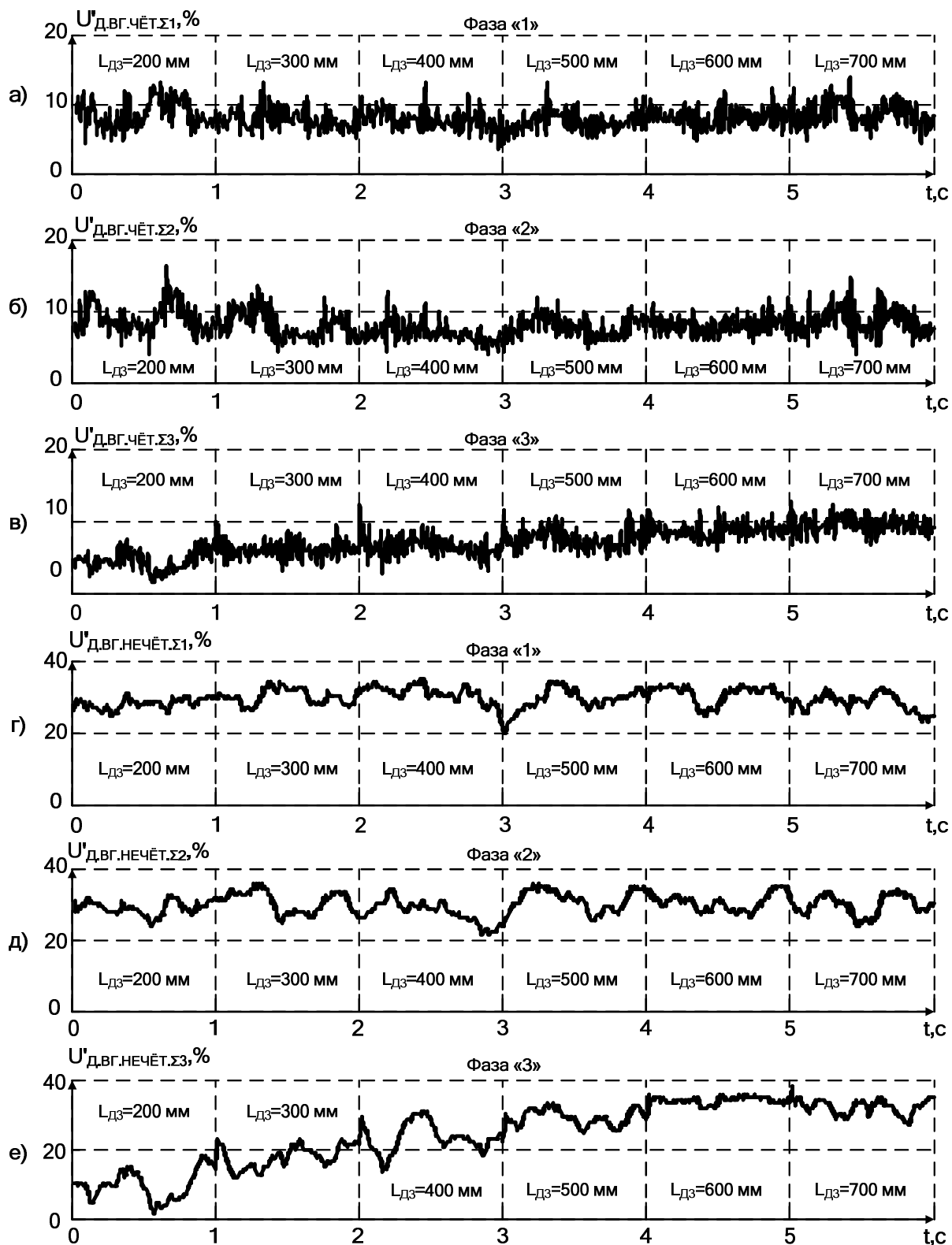


Рис. 6. Осциллограммы относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник напряжения дуги по каждой из 3 фаз для: а, б, в – чётных гармоник; г, д, е – нечётных гармоник при ступенчатом изменении величины длины электрической дуги в фазе «3»

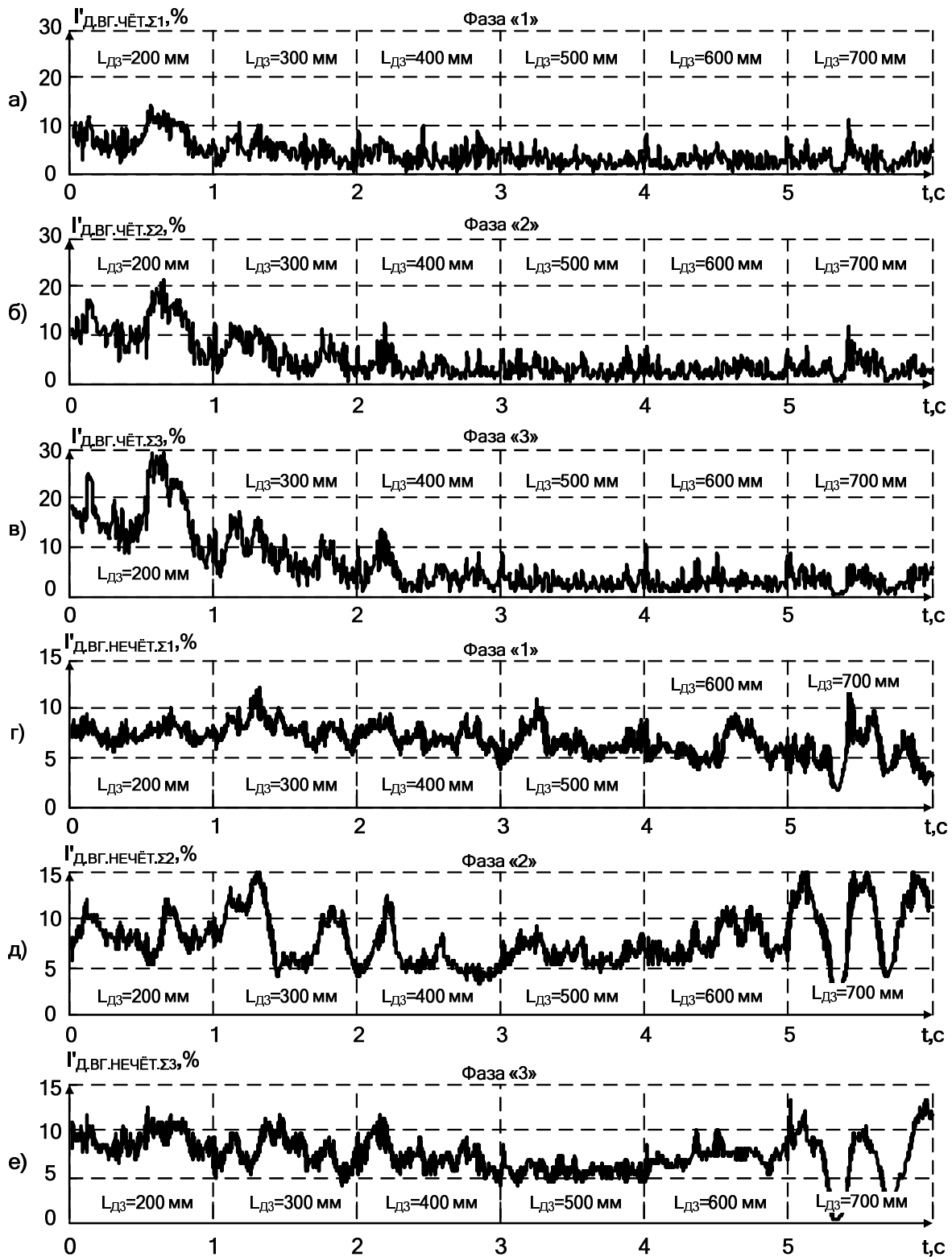


Рис. 7. Осциллограммы относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник тока дуги по каждой из 3 фаз для: а, б, в – чётных гармоник; г, д, е – нечётных гармоник при ступенчатом изменении величины длины электрической дуги в фазе «3»

Анализ осциллограмм позволил получить теоретическое подтверждение для следующих выводов.

1. В симметричном режиме, когда длины дуг одинаковы, величины Θ_d в наибольшей мере влияют на нечётные гармоники, а изменение $K_{ВЭ}$, в свою очередь, влияет на чётные гармоники. При этом в обоих случаях сигналы относительного действующего значения суммарных чётных и нечётных гармоник более стабильны для напряжения электрической дуги, вследствие чего при использовании в системе управления нуждаются в меньшей величине постоянной времени сглаживающего фильтра.

2. Несимметричные режимы работы оказывают сильное влияние на чётные и нечётные гармоники тока электрической дуги, в то время как гармоники напряжения дуги данному влиянию подвержены в значительно меньшей мере, что осложняет применение анализа гармонического состава [14–23] токов дуг для решения задач диагностики стадии плавления шихты на начальных стадиях ввиду необходимости применения сглаживающих фильтров с большой постоянной времени, что приведёт к потерям информации о непродолжительных стадиях.

Заключение

1. Использование информации о гармоническом составе токов и напряжений дуг является перспективным направлением в развитии усовершенствованных систем управления электрическим режимом ДСП и УКП с интеллектуальной системой диагностики технологических стадий плавки. В ходе исследований с использованием математической модели теоретически обоснована тесная связь между уровнем нечётных гармоник тока и напряжения дуги и тепловой постоянной времени, а также связь между уровнем чётных гармоник и величиной коэффициента вентильного эффекта. Показано, что величина вентильного эффекта изменяется от максимального к минимальному значению по мере полного расплавления твёрдой шихты, а величина тепловой постоянной времени достигает максимального значения при экранировании дуг вспененным шлаком, что характерно

для стадии доводки. Таким образом, было сделано теоретическое обоснование для полученных ранее экспериментальных зависимостей изменения гармонического состава токов и напряжений дуг от стадий плавки. В частности, доказано, что сокращение доли чётных гармоник в составе сигналов токов и напряжений дуг в начале плавки происходит существенно быстрее, чем сокращение доли нечётных гармоник.

2. Результаты математического моделирования подтвердили эффективность построения системы диагностики стадии плавления шихты, в соответствии с которым анализ чётных гармоник используется в начале плавки, а нечётных гармоник – в конце. Кроме того, для гармоник напряжений электрических дуг доказана меньшая зависимость изменения уровней гармоник при колебаниях длин электрических дуг и их несимметрии, чем у гармоник тока дуг, что является важным преимуществом используемого способа диагностики стадий расплавления металлошихты.

3. Информация о гармоническом составе тока электрической дуги, также как и гармоническом составе напряжения дуги, может быть использована при разработке системы диагностики стадии плавления металлошихты. При этом анализ гармонического состава тока предпочтительнее использовать на сталеплавильных агрегатах, где используется режим горения дуг, близкий к симметричному, а также агрегатов с низкой интенсивностью возмущающих воздействий (например, печей с технологией непрерывной подвалки шихты конвейером, установок ковш-печь). Анализ гармонического состава напряжения дуги больше подходит для установок с сильными возмущающими воздействиями, а также значительным влиянием несимметричных режимов (шахтные печи, печи с классической завалкой через отводимый свод). В иных случаях применение вычислительных мощностей для расчёта мгновенного значения напряжения дуги нецелесообразно ввиду одинаковой эффективности применения анализа гармоник тока дуги.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011).

Литература

1. Bowman, B. *Arc Furnace Physics* / B. Bowman, K. Krüger. – Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2009. – 268 p.
2. Николаев, А.А. Сравнительный анализ современных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковши-печь / А.А. Николаев, П.Г. Тулунов, В.С. Ивекеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 52–64. DOI: 10.1109/uralcon49858.2020.9216238
3. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор»: моногр. / А.А. Николаев. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. – 318 с.
4. Cassie, A.M. *Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity)* / A.M. Cassie // CIGRE Report No. 102. – 1939. – P. 588–608.

5. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / А.А. Николаев, Ж.Ж. Руссо, В. Сџымански, П.Г. Тулупов // 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
6. Николаев, А.А. Экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений дуг мощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, Е.Я. Омельченко // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 4 (41). – С. 63–72. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-63-72
7. Nikolaev, A.A. 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 / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, A.V. Anufriev // Proceedings of 16th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM2015). IEEE. Vochum, Germany, 18–20 Nov. – 2015. – P. 302–308. DOI: 10.1109/rem.2015.7380411
8. Николаев, А.А. Усовершенствованный способ определения параметров электрического контура электродуговой сталеплавильной печи на основе экспериментальных данных / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2020. – № 3. – С. 58–68. DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-58-68
9. Николаев, А.А. Разработка математической модели электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор» / А.А. Николаев, В.В. Анохин, П.Г. Тулупов // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 4 (33). – С. 61–71. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-61-71
10. Krüger, K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces): Dr.-Ing. Dissertation / K. Krüger. – Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998. – 234 p.
11. Boulet, B. Modeling and control of an electric arc furnace / B. Boulet, G. Lalli, M. Ajerschy // Presented at the American Control Conference, Denver, CO, USA. Jun. 4–6, 2000.
12. Panoiu, M. Modeling of the electric arc behaviour of the electric arc furnace / M. Panoiu, C. Panoiu, L. Ghiormez // 5th International Workshop on Soft Computing Applications. – Szeged, Hungary, 2012. – P. 261–271. DOI: 10.1007/978-3-642-33941-7_24
13. Nikolaev, A.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, D.A. Savinov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2017. – P. 1–6. DOI: 10.1109/icieam.2017.8076205
14. 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 / C. Jaipradidtham // Proceedings of the Power Systems (ICPS), 2016 IEEE 6th International Conference on. – New Delhi, India, 2016. – P. 1–6. DOI: 10.1109/icps.2016.7584250
15. Harmonic Measurements and Analysis in a Modern Steel Manufacturing Facility / M. Bao, J. Xia, X. Yin et al. // Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. Providence. RI. USA. – 2010. – P. 1–6. DOI: 10.1109/pes.2010.5589983
16. Donsión, M.P. Influence of a SVC on AC Arc Furnaces Harmonics, Flicker and Unbalance. Measurement and Analysis / M.P. Donsión, J.A. Güemes, F. Oliveira // Proceedings of the MELECON 2010 – 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. – Valletta, Malta, 2010. – P. 1423–1428. DOI: 10.1109/melcon.2010.5476032
17. Power Quality Measurements in a Steel Industry with Electric Arc Furnaces / P.E. Issouribehere, J.C. Barbero, F. Issouribehere, A. Barbera // 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. – P. 1–8. DOI: 10.1109/pes.2008.4596177
18. Vatankulu, Y.E. Harmonics and Interharmonics Analysis of Electrical Arc Furnaces Based on Spectral Model Optimization with High Resolution Windowing / Y.E. Vatankulu, Z. Sentirk, O. Salor // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2017. – Iss. 99. – P. 1–8. DOI: 10.1109/ias.2016.7731905
19. Uz-Logoglu, E. Online Characterization of Interharmonics and Harmonics of AC Electric Arc Furnaces by Multiple Synchronous Reference Frame Analysis / E. Uz-Logoglu, O. Salor, M. Ermis // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Vol. 52, iss. 3. – P. 2673–2683. DOI: 10.1109/ias.2015.7356882
20. El-Amin, I.M. Power Quality Indices: A Saudi Steel Mill Case Study / I.M. El-Amin, A. Al-Elyani, A. Shuaib // Proceedings of the Computing, Electrical and Electronics Engineering (ICCEEE), 2013 International Conference on. – Khartoum, Sudan, 2013. – P. 99–102. DOI: 10.1109/icceee.2013.6633914
21. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace / G.W. Chang, Y.J. Liu, H.M. Huang, S.Y. Chu // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2016. Montreal. Canada. IEEE. – P. 1–4. DOI: 10.1109/pes.2006.1709471

22. Ye Xiao-Mei. *The Harmonic Detection based on Wavelet Transform and FFT for Electric Arc Furnaces* / Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He // *Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*. Baoding, China. IEEE. – 2009. – P. 408–412. DOI: 10.1109/icwapr.2009.5207486

23. *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. – P. 902–906. DOI: 10.1109/icpst.2004.1460122

Николаев Александр Аркадьевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; aa.nikolaev@magtu.ru.

Тулупов Платон Гарриевич, аспирант кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; tulupov.pg@mail.ru.

Денисевич Александр Сергеевич, аспирант кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; denisevich993@mail.ru.

Рыжевол Сергей Сергеевич, магистрант кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; snaffls18@gmail.com.

Поступила в редакцию 25 апреля 2021 г.

DOI: 10.14529/power210208

MATHEMATICAL MODEL FOR THE HARMONIC ANALYSIS OF ELECTRIC ARC CURRENTS AND VOLTAGES IN AN ELECTRIC ARC FURNACE

A.A. Nikolaev, aa.nikolaev@magtu.ru,
P.G. Tulupov, tulupov.pg@mail.ru,
A.S. Denisevich, denisevich993@mail.ru,
S.S. Ryzhevov, snaffls18@gmail.com

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

This paper analyzes how the relative effective total odd and even current and voltage harmonics of an electric arc in a furnace correlate with the thermal time constant of the arc, with the valve effect, and with the asymmetrical operation. The furnace circuit model was used to theorize upon the effectiveness of using even harmonics data to diagnose the charge melting stage during initial melting; and odd harmonics to analyze the late stages. The results of mathematical modeling helped draw guidelines for the design of the charge melting diagnosis unit to be part of the electrical parameters control system; the unit design depends on the furnace type. The results could be of use in research of better control algorithms for electric arc furnaces and ladle furnaces with a focus on reducing the energy costs of producing molten steel.

Keywords: electric furnace, even harmonics, odd harmonics, electric arc voltage, electric arc current, valve effect, thermal time constant of the arc, asymmetric operation, control system.

References

1. Bowman B., Krüger K. *Arc Furnace Physics*. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2009. 268 p.
2. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ivekeev V.S. [The Comparative Analysis of Modern Electric Modes Control Systems in Electric Arc and Ladle Furnaces]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 52–64. (in Russ.) DOI: 10.1109/uralcon49858.2020.9216238
3. Nikolaev A.A. [Enhancing the Performance of the Electric Arc Furnace – Static Var Compensator Complex: monograph]. Magnitogorsk, Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017. 318 p. (in Russ.)

4. 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, pp. 588–608.
5. 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. (in Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120
6. 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 Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-63-72
7. 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.2015.7380411
8. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Denisovich A.S. [An Improved Method of Determining the Electric Circuit Parameters for an Electric Arc Furnace Based on the Experimental Data]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 3, pp. 58–68. (in Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-58-68
9. Nikolaev A.A., Anokhin V.V., Tulupov P.G. [Design of Mathematical Model of Electrotechnical Complex “Electric Arc Furnace – Static Var Compensator”]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4 (33), pp. 61–71. (in Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-61-71
10. Krüger K. *Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen* [Modeling and Control of the Electrical Energy Conversion in Arc Furnaces]. Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
11. Boulet B., Lalli G., Ajerschv M. [Modeling and Control of an Electric Arc Furnace]. *Presented at the American Control Conference*, Denver, CO, USA, Jun. 4–6, 2000.
12. Panoiu M., Panoiu C., Ghiormez L. [Modeling of the Electric Arc Behavior of the Electric Arc Furnace]. *5th International Workshop on Soft Computing Applications*. Szeged, Hungary, 2012, pp. 261–271. DOI: 10.1007/978-3-642-33941-7_24
13. 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)*, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/icieam.2017.8076205
14. 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
15. 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
16. 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
17. 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.2008.459617
18. 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*, 2017, iss. 99, pp. 1–8. DOI: 10.1109/ias.2016.7731905
19. 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*, 2016, vol. 52, iss. 3, pp. 2673–2683. DOI: 10.1109/ias.2015.7356882
20. 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
21. 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

22. 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

23. 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

Received 25 April 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием математической модели / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич, С.С. Рыжевол // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 72–84. DOI: 10.14529/power210208

FOR CITATION

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Denisevich A.S., Ryzhevol S.S. Mathematical Model for the Harmonic Analysis of Electric Arc Currents and Voltages in an Electric Arc Furnace. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 72–84. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210208