



Лютая А. В. /к. т. н./
Донбасская ГМА

Экспериментальные исследования электромеханических колебаний гибких кабелей дуговой сталеплавильной печи

Установлено, что интервалы частот и продолжительность флуктуаций электрических параметров совпадают с интервалами собственных частот колебаний гибких кабелей. Подтверждено влияние колебаний гибких кабелей на электрические параметры короткой сети ДСП и регуляторы перемещения электродов. Оценка влияния возмущений в силовой цепи ДСП позволит повысить качество регулирования мощности и, следовательно, увеличит производительность печи. Это дает возможность разработать энергоэффективные регуляторы перемещения электродов. Результаты исследований могут быть использованы для всех электродуговых печей. Ил. 5. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: привод перемещения электродов, система управления, электромеханические возмущения

It was established that the frequency intervals and the duration of fluctuations of the electrical parameters coincide with intervals of natural frequencies of fluctuation of flexible cables. The impact of fluctuations of the flexible cables on electrical parameters of short circuit of EAF and on movement regulators of electrodes was confirmed. The diagnostic of impact of the disturbances in power circuit of the arc steel furnace will improve the quality of power regulation and therefore increase the productivity of the furnace. It gives the opportunity to develop energy-efficient movement regulators of the electrodes. The results of researches can be used for all electroarc furnaces.

Keywords: movement driven of the electrodes, control system, electromechanic disturbance

Постановка задачи

При работе дуговых сталеплавильных печей (ДСП) наиболее энергозатратным является период расплава шихты. Этот период характеризуется нестабильностью горения дуг, связанной с прогоранием каналов горения, оплавлением и падением кусков шихты, электродинамическим взаимодействием подвижных токоведущих элементов печи и дуг при коротких замыканиях. Исследованиями [1, 2] установлено, что эксплуатационные короткие замыкания вызывают колебания гибких кабелей и других подвижных элементов короткой сети из-за резких скачков электродинамических усилий между фазами и модуляцией взаимных индуктивностей, что приводит к возникновению внешних возмущений в каналах управления регуляторов перемещения электродов.

Из-за отсутствия полной адаптивности к возмущениям существующие токовые, дифференциальные и импедансные регуляторы перемещения электродов реагируют на эти возмущения, что приводит к нестабильности горения дуг, увеличению времени периода расплава, перерасходу электроэнергии и, соответственно, к снижению производительности печи [3].

Для разработки средств компенсации данных электромеханических колебаний гибких токопроводов, необходимо исследовать их влияние на параметры короткой сети с целью получения количе-

ственных оценок возмущающих воздействий.

Проблемами дуговых сталеплавильных печей, в частности исследованием колебаний гибких токопроводов, занималось множество ученых. Исследованием электромеханических характеристик гибких кабелей дуговых печей занималась Тесля Н. Б. [4]. Однако в своей работе она исследовала только трехфазную цепь без учета работы приводов перемещения электродов (ППЭ) и реакции длин дуг на колебания гибких токопроводов. Исследователи Кадар И. И. и Бирингер П. П. также исследовали взаимосвязь колебаний гибких кабелей и электрических параметров печи [5]. Однако их работа не позволяет оценить принципы построения и возможность применения разработанной ими модели.

В работах [1, 2, 6] была разработана электромеханическая система управления (ЭМСУ) ППЭ ДСП, включающая модель трехфазной электрической сети ДСП, модель электромеханических колебаний гибких кабелей ДСП и модель системы управления ППЭ ДСП. Данная модель позволяет промоделировать ситуацию колебаний гибких кабелей с целью оценить их последствия на электрические координаты короткой сети ДСП, в том числе и на изменения длин дуг.

Для разработки средства компенсации электромеханических колебаний гибких токопроводов необходимо подтвердить адекватность разработанной модели электромеханической системы

управления приводом перемещения электродов ДСП.

Целью работы является экспериментальная оценка влияния колебаний гибких кабелей на стабильность работы ППЭ ДСП-50 Публичного акционерного общества «Новокураматорский машиностроительный завод» (ПАО НКМЗ) в производственных условиях. Результаты эксперимента позволят проверить адекватность разработанной модели ЭМС ППЭ ДСП и разработать способ компенсации данных возмущений, поэтому работа является актуальной.

При этом мы не должны вмешиваться в техпроцесс плавки стали, принудительно создавая дополнительные короткие замыкания с целью сравнения результатов экспериментальных исследований и с помощью разработанной модели. Поэтому можно провести эквивалентные исследования без принудительного короткого замыкания, которые также будут подтверждать взаимосвязь механических колебаний гибких кабелей и изменение электрических параметров короткой сети, в том числе и колебания длин дуг.

Поэтому для оценки влияния возмущений на электромеханические параметры реальной печи ДСП-50 ПАО НКМЗ в производственных условиях проводился ряд исследований при внешнем возмущающем воздействии в разных фазах путем имитации отклонения кабеля во время спокойного горения дуг (период доводки), когда процесс плавки наиболее стабилен (чтобы на эксперимент не влияли внешние эксплуатационные возмущения). Параллельно проводились аналогичные исследования в модели электромеханической системы ДСП в среде MatLab. Затем, с использованием известных методик теории обработки эксперимента, теоретические и экспериментальные исследования были сопоставлены.

Для проведения экспериментальных исследований СУ ППЭ ДСП при колебаниях гибких кабелей в данной работе используются: СУ ППЭ ДСП-50 ПАО НКМЗ; математическая модель ЭМСУ ППЭ ДСП, разработанная в [1, 2, 6]; изолированный капроновый канат длиной 15 м; значения сил токов в каждой фазе короткой сети, снимаемые с датчиков токов фаз короткой сети с помощью действующей информационно-измерительной системы; видеокамера для определения количественных показателей колебаний гибких кабелей (30 кадров в секунду).

Наблюдения за поведением гибких кабелей в производственных условиях при коротких замыканиях и проведение серии опытов с помощью разработанной модели показали, что при коротких замыканиях наиболее часто имеет место отклонение гибкого кабеля на угол порядка 15°. Поэтому далее будет приведен один из экспериментов при отклонении гибкого кабеля на угол 15° и сравнительный анализ графиков, полученных экспериментально и с использованием разработанной ранее модели. При этом было установлено, что максимальные

углы отклонения гибких кабелей крайних фаз от вертикали, полученные с помощью модели, могут достигать 30°, а фазы В – 10°, что совпадает с результатами исследований Р. А. Бикеева [7].

Эксперимент проводился следующим образом. При полностью отключенном печном трансформаторе к нижней точке петли гибкого кабеля фазы С, крайнего со стороны пультовой, привязывался изолированный капроновый канат длиной 15 м (рис. 1).

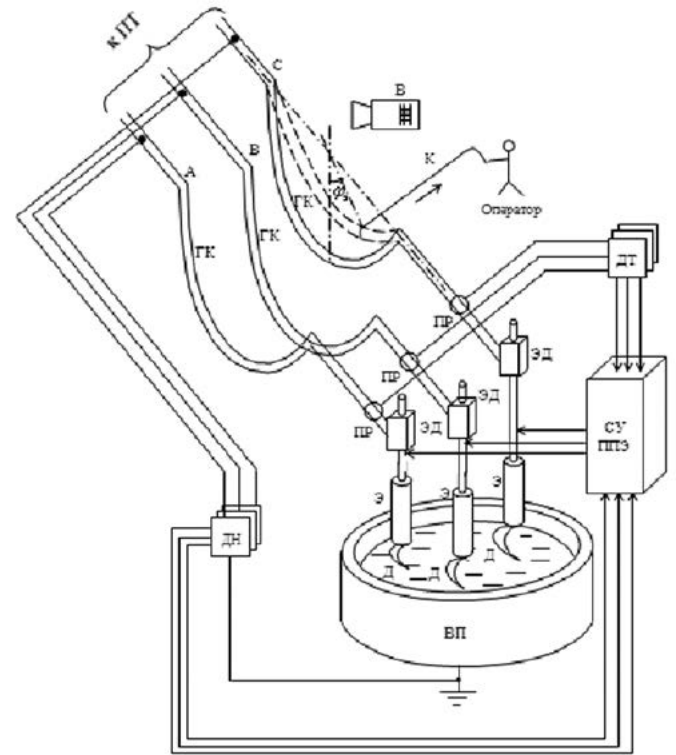


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: ПТ – печной трансформатор; ГК – гибкий кабель; К – канат; О – оператор; В – видеокамера; ПР – пояса Роговского; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; СУ ППЭ – система управления приводом перемещения электродов; ЭД – электрододержатель; Э – электрод; Д – электрическая дуга; В – ванна металла; φ – угол отклонения оператором гибкого кабеля от вертикали; ВП – ванна печи

Далее производился ввод параметров директивного графика плавки, включение печного трансформатора, опускание электродов, зажигание электрических дуг и плавление металла. В период доводки металла, когда дуги горели устойчиво, в определённый фиксированный момент времени производился механический ввод в систему низкочастотного внешнего возмущения путем отклонения гибкого токопровода фазы С с помощью каната на угол 15°. После отпуска каната кабель возвращался в вертикальное положение со свободными затухающими колебаниями. При этом производилось одновременное видеонаблюдение за перемещением кабельных гирлянд, снятие и фиксация данных с датчиков фазных токов (трансформаторов токов) на короткой сети и длин электрических дуг в ре-

альном масштабе времени. Данные экспериментов заносились в память жесткого диска сервера управления базой данных ДСП-50, после чего производилась обработка массивов данных экспериментов. Для оценки достоверности результатов эксперименты проводились многократно ($n = 12$).

Используя средства вычислительной техники и покадровую развертку, проводилась обработка видеоматериалов, снятых для определения количественных показателей колебаний гибких кабелей во время эксперимента. На рис. 2 приведен график изменения угла отклонения гибкого кабеля фазы С от вертикали при искусственном внешнем возмущении в период доводки в момент времени 15 с путем его отклонения на угол 15° . Кабели двух других фаз при этом были неподвижны.

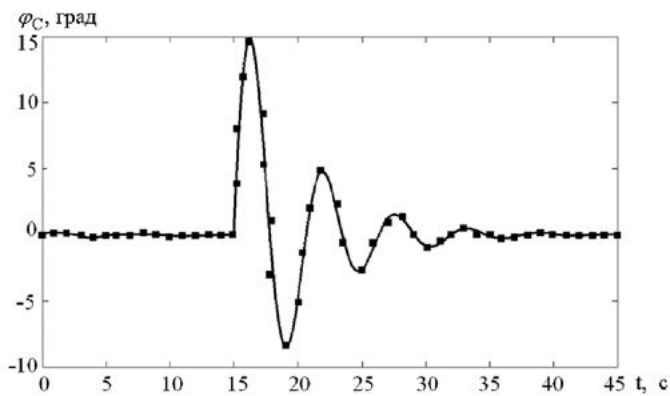


Рис. 2. График изменения угла отклонения гибкого кабеля фазы С от вертикали при его колебании

По графику видно, что в момент времени 15 с кабель фазы С был отклонён от вертикали на угол 15° , после чего начинает совершать свободные затухающие колебания продолжительностью 18 с. Частота колебаний составляет 0,18 Гц.

На рис. 3 приведены графики изменения расстояний между отклоняющимися гибкими кабелями, полученные с помощью модели и совпадающие с реальными колебаниями гибких кабелей при эксперименте, что подтвердила покадровая развертка видеокамеры.

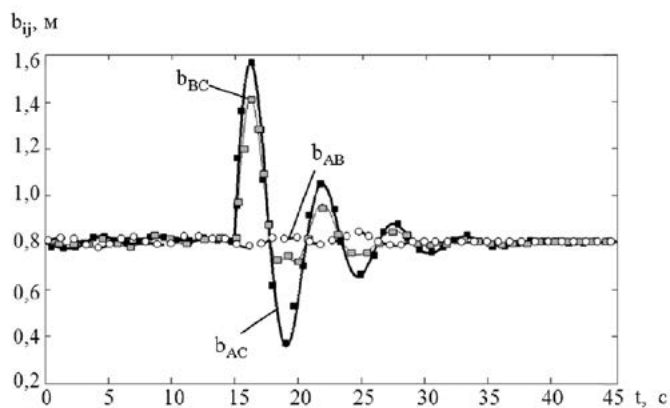
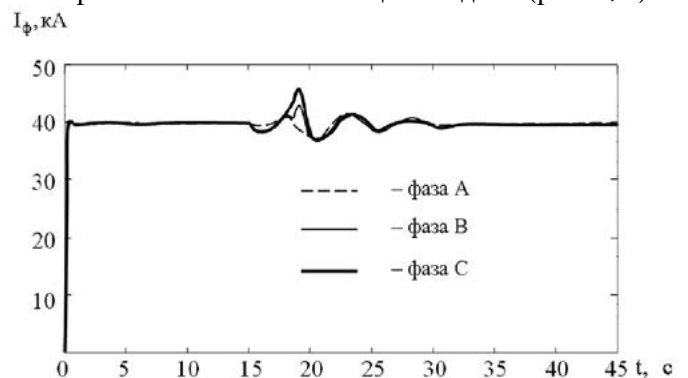
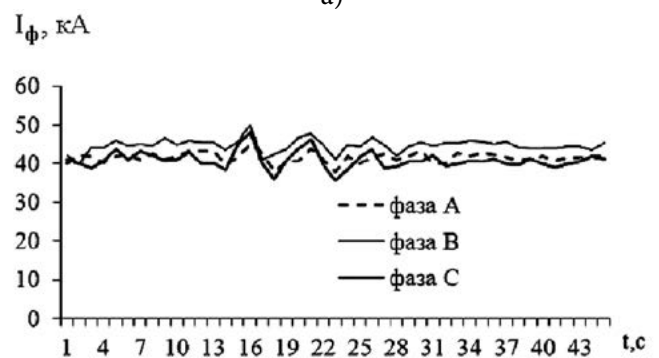


Рис. 3. Графики изменения расстояний между отклоняющимися гибкими кабелями трех фаз ДСП-50 при колебании кабеля фазы С

Таблицы данных изменения длин дуг и фазных токов, полученные в производственных условиях, были экспортированы в программу Microsoft Excel. Далее проводился сравнительный анализ графиков изменения фазных токов и длин дуг, полученных экспериментально и с помощью модели (рис. 4, 5).

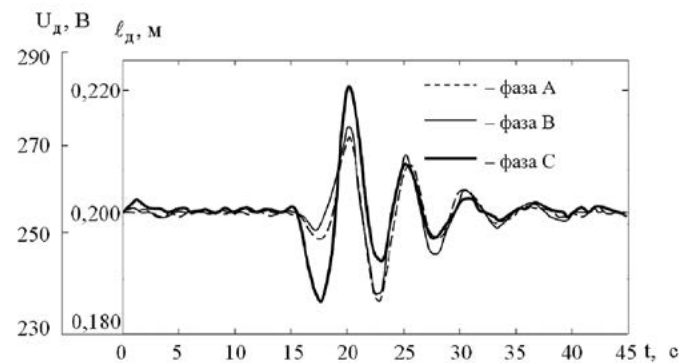


а)

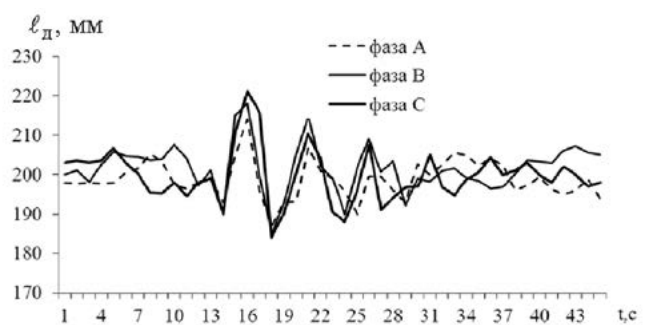


б)

Рис. 4. Графики изменения фазных токов при искусственном внешнем возмущении в фазе С: а) полученные в модели; б) полученные экспериментально



а)



б)

Рис. 5. Графики изменения длин дуг при искусственном внешнем возмущении в фазе С: а) полученные в модели; б) полученные экспериментально

Из графиков изменения длин дуг и фазных токов видно влияние внешнего механического возмущения, то есть принудительного колебания кабеля фазы С. Колебания всех этих параметров также длются 16,5-18,4 с.

Графики изменения длин дуг являются результатом работы регуляторов перемещения электродов, поскольку между сигналом управления с выхода регулятора и длиной дуги существует связь. Поэтому из графиков изменения длин дуг (см. рис. 5) видно, что регуляторы работают нестабильно, отрабатывая возмущения электрических параметров, вызванные принудительным колебанием кабеля фазы С.

На рис. 2 при эксперименте на ДСП-50 было установлено, что частота колебаний гибкого кабеля составляет 0,18 Гц. В этих же интервалах находятся и частоты случайных периодических колебаний токов и длин дуг. Причем наиболее четко выражена частота 0,18 Гц, которая просматривается именно при колебании гибкого кабеля.

Сравнительная оценка показателей возмущений, полученных с помощью разработанной модели и во время эксперимента, показывает, что при имитации колебания гибкого кабеля в фазе происходят колебания всех электрических параметров, при этом глубина модуляции токов доходит до 15 % в той фазе, где проводилось отклонение кабеля, что после работы регуляторов перемещения электродов приводит к дисперсии длин дуг до 45 мм². Продолжительность и частота колебаний электрических параметров совпадает и соответствует частоте колебаний гибких кабелей, что опять-таки доказывает реакцию регуляторов перемещения электродов на любые изменения электрических параметров, в том числе связанные с электромеханическими колебаниями.

Таким образом, можно сделать вывод, что разброс электромеханических параметров в разработанной в [1, 2, 6] модели и по экспериментальным данным не выходит за пределы 5 %, что свидетельствует об адекватности модели электромеханической системы управления приводом перемещения электродов ДСП физическому объекту.

Выводы

1. Экспериментальные исследования системы управления приводом перемещения электродов ДСП-50 ПАО НКМЗ и анализ процессов изменения токов и длин дуг, полученных экспериментальным путем при искусственном внешнем механическом возмущении ДСП-50, выявили, что интервалы частот и продолжительность колебательных процессов электрических параметров короткой сети ДСП совпадают с интервалами собственных частот и продолжительностью колебаний гибких кабелей.

2. Сравнительной оценкой параметров переходных процессов реальной электромеханической системы приводом перемещения электродов ДСП-50 и модели при колебаниях гибких кабелей установлена адекватность разработанной модели электро-

механической системы управления приводом перемещения электродов ДСП. Было подтверждено влияние колебаний гибких кабелей на электрические параметры короткой сети ДСП и регуляторы перемещения электродов, что дает возможность разработать способ компенсации электромеханических колебаний гибких кабелей электромеханической системы управления приводом перемещения электродов ДСП.

Библиографический список

1. Исследование электромеханических колебаний гибких кабелей дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Сб. научн. тр. ДонГТУ. – Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2009. – Вип. 9 (158). – С. 179-185.
2. Оценка электромеханических возмущений в силовых цепях дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 при эксплуатационных коротких замыканиях / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Вестник Кременчугского НТУ. Вып. 3, ч. 1. – Кременчуг, 2009. – С. 231-234.
3. Оценка адаптивности регуляторов мощности дуговых сталеплавильных печей к внешним возмущениям / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Вестник НТУ «Харьковский политехнический институт» Серия «Электротехника, электроника и электропривод». – 2010. – Вып. 28. – С. 462-463.
4. Тесля Н. Б. Исследование электромеханических характеристик гибких токопроводов дуговых сталеплавильных печей и разработка технических требований к их конструкциям: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / Новосибирский гос. индустр. ун-т. – Новосибирск, 1998. – 198 с.
5. Kadar I. I., Biringer P. P. The influence of cable swings on the electrical parameters of flexible cables. – Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet.: Pap. Ind. Appl. Conf. 25 th, Seattle, Wash., Oct. 7-12, 1990. – P. 2031-2035.
6. Математическая модель электромеханической системы колебаний гибких токопроводов дуговой печи [Электронный ресурс] / А. В. Лютая, А. Н. Обухов // Научный вестник ДГМА. – 2013. – № 1 (11Е). – С. 153-163. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science-vesnik/№1\(11E\)_2013/nomer_1\(11E\)_2013.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science-vesnik/№1(11E)_2013/nomer_1(11E)_2013.html).
7. Бикеев Р. А. Динамические режимы в электромеханических системах дуговых сталеплавильных печей и их воздействие на вводимую активную мощность: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: 05.09.10 – Электротехнология / Новосибирский государственный технический университет. – 2004. – 27 с.

Поступила 14.01.2014