

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГИБКИХ ТОКОПРОВОДОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ РАБОТЫ РЕГУЛЯТОРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Панкратов А. И., Лютая А. В., Верешко В. П.

Приведены результаты статистических исследований случайных процессов изменений действующих значений токов, напряжений и длин дуг трехфазных электросталеплавильных печей переменного тока. На основе автокорреляционного анализа случайных процессов изменений токов, напряжений и длин дуг выявлены эргодичности этих процессов и строгие периодичности флуктуаций. Установлено, что интервалы частот флуктуаций электрических параметров совпадают с интервалами собственных частот колебаний гибких кабелей. Оценка влияния возмущений в силовой цепи ДСП позволит повысить качество регулирования мощности и, следовательно, увеличит производительность печи. Полученные частотные характеристики дают возможность разработать энергоэффективные регуляторы перемещения электродов. Результаты исследований могут быть использованы для всех электродуговых печей.

Наведено результати статистичних досліджень випадкових процесів змін діючих значень струмів, напруг і довжин дуг трифазних электросталеплавильних печей змінного струму. На основі автокореляційного аналізу випадкових процесів змін струмів, напруг і довжин дуг виявлені ергодичності цих процесів і строгі періодичності флуктуацій. Встановлено, що інтервали частот флуктуацій електричних параметрів збігаються з інтервалами власних частот коливань гнучких кабелів. Оцінка впливу збурень в силовому ланцюгу ДСП дозволить підвищити якість регулювання потужності і, отже, збільшить продуктивність печі. Отримані частотні характеристики дають можливість розробити енергоефективні регулятори переміщення електродів. Результати досліджень можуть бути використані для всіх електродугових печей.

The results of statistical research of random processes of change operating currents, voltages, and lengths of the arcs of three-phase furnaces. Based on autocorrelation analysis of random processes of change of currents, voltages, and lengths of arcs ergodicity of these processes and the strict periodicity of the fluctuations are identified. Established that the frequency intervals of fluctuations of the electrical parameters coincide with intervals of natural frequencies of flexible cables. 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. Received frequency characteristics give the opportunity to develop energy-efficient regulators of move of electrodes. Results of researches can be used for all electroarc furnaces.

Панкратов А. И.

канд. техн. наук, доц. каф. АПП ДГМА

Лютая А. В.

ассистент каф. АПП ДГМА
neytiri77@mail.ru

Верешко В. П.

нач. КПЦ «НКМЗ – Автоматика» ПАО «НКМЗ

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ПАО «НКМЗ» – Публичное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск.

УДК 621.365.2

Панкратов А. И., Лютая А. В., Верешко В. П.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГИБКИХ ТОКОПРОВОДОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ РАБОТЫ РЕГУЛЯТОРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

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 взаимодействиям 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, а это 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 средства адаптации регуляторов перемещения электродов ДСП к внешним электродинамическим возмущениям, связанным с колебаниями подвижных элементов короткой сети, необходимо исследовать их влияние на параметры короткой сети с целью получения количественных оценок возмущающих воздействий.

Проблемами дуговых сталеплавильных печей, в частности исследованием колебаний гибких токопроводов, занималось множество учёных. 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.

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.

Корреляционные связи между токами дуг и мощностью ДСП исследовались Лозинским О. Ю., Усачевым М. В. и др. [6]. Оценка частотных характеристик флуктуаций электрических параметров дуговых сталеплавильных печей в этих работах не проводилась.

Целью работы является экспериментальная оценка влияния колебаний гибких кабелей на стабильность работы регуляторов перемещения электродов ДСП-50 ПАО «НКМЗ».

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).

В период доводки металла, когда дуги горели устойчиво, в момент времени 11 часов 48 минут 46 секунд производился ввод в систему внешнего возмущения путем отклонения гибкого токопровода фазы С по средством каната на угол 15° . Кабели двух других фаз при этом были неподвижны. После отпускания 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 напряжений, фазных токов на короткой сети и длин электрических дуг в реальном масштабе времени. Данные экспериментов заносились в память жесткого диска сервера управления базой данных ДСП-50, после чего производилась обработка массивов данных экспериментов методом автокорреляционного анализа. Для оценки достоверности результатов эксперименты проводились многократно ($n = 12$).

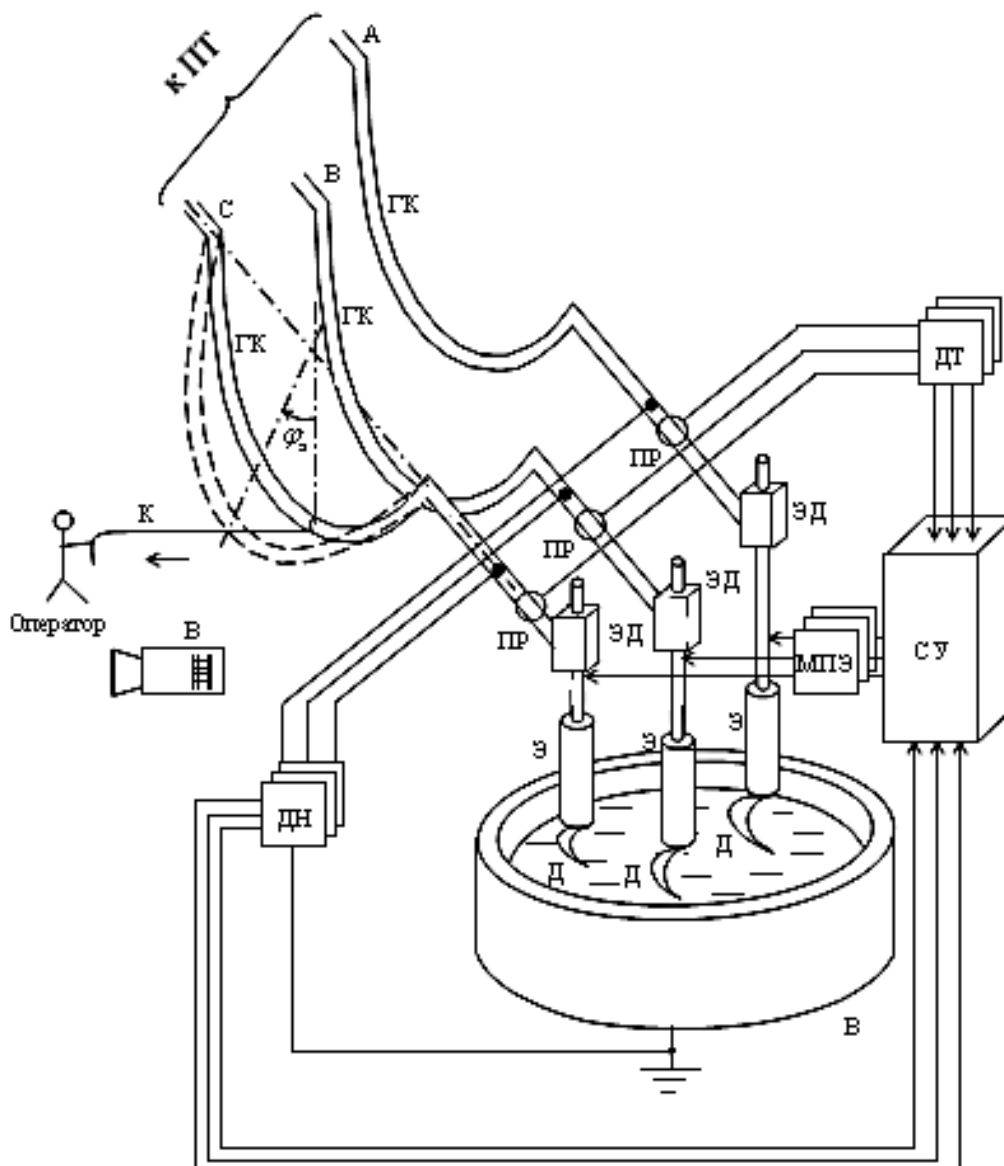


Рис. 1. Схема проведения эксперимента:

ПТ – печной трансформатор; ГК – гибкий кабель; К – канат; О – оператор; В – видеокамера; ПР – пояса Роговского; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; СУ – система управления электрическим режимом; ЭД – электрододержатель; Э – электрод; Д – электрическая дуга; В – ванна металла; φ_3 – угол отклонения оператором гибкого кабеля от вертикали

Для разработки адаптивных регуляторов перемещения электродов необходимо оценить частотные характеристики флуктуаций этих параметров.

Обработка видеоматериалов, снятых для определения количественных показателей колебаний гибких кабелей во время эксперимента проводилась методом покадровой развертки. Построение графиков проводилось в реальном масштабе времени.

На рис. 2 приведены совмещённые графики изменения длины дуги фазы С, тока фазы С, напряжения фазы С и график изменения угла отклонения гибкого кабеля фазы С от вертикали при искусственном внешнем возмущении в фазе С.

По графику изменения угла отклонения гибкого кабеля фазы С от вертикали видно, что в 11 часов 48 минут 46 секунд кабель фазы С был отклонён от вертикали на угол 15° , после чего начинает совершать свободные затухающие колебания продолжительностью приблизительно 13 с. Частота колебаний составляет 0,2 Гц.

Из графиков изменения длин дуг, фазных токов и напряжений видно влияние внешнего механического возмущения, начинающегося как раз в 11:48:46. Колебания всех этих параметров также длятся 13 с. Максимальная глубина модуляции токов ДСП-50 составляет 15 %.

График изменения длины дуги является результатом работы регулятора перемещения электрода, поскольку между сигналом управления с выхода регулятора и длиной дуги существует пропорциональная связь. Поэтому из графика изменения длины дуги видно, что регулятор работает нестабильно, отрабатывая возмущения электрических параметров, вызванные принудительным колебанием кабеля фазы C .

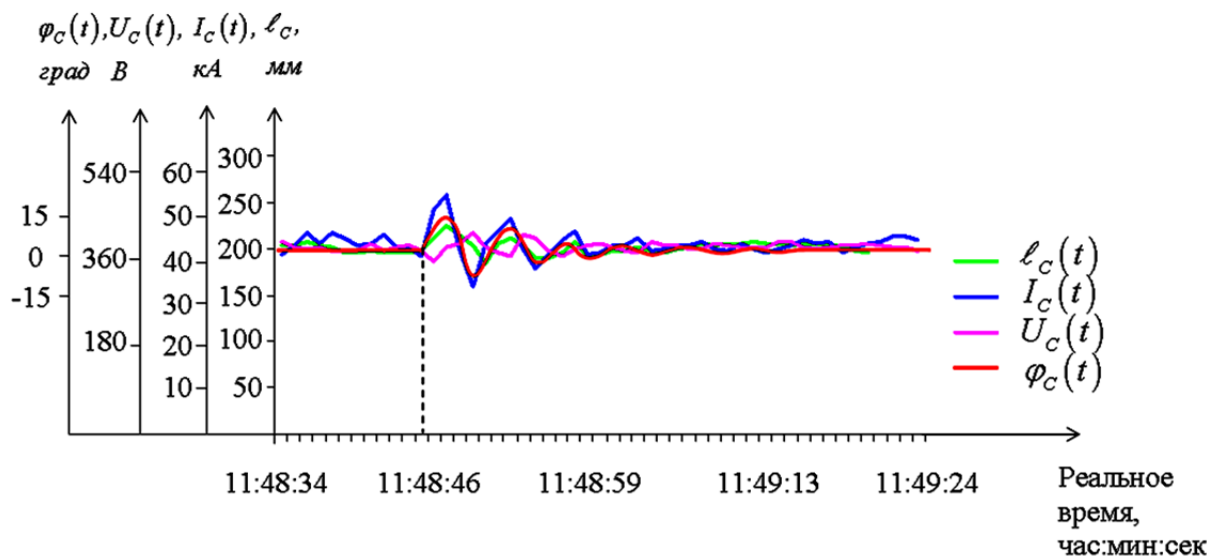


Рис. 2. Совмещённые графики изменения электромеханических параметров в фазе C при колебании кабеля фазы C

Оценка частотных характеристик флуктуаций электрических параметров ДСП в период доводки при искусственном возмущении в фазе C производилась на основе автокорреляционного анализа [7].

Автокорреляционные функции $R(\tau)$ процессов $\ell(t)$, $I(t)$, $U(t)$ трех фаз определялись по формуле:

$$R(\tau) = \left| \frac{1}{n - \sigma_{F(t)}^2} \sum_{i=1}^n ((F_i(t) - m_{F(t)}) \cdot (F_i(t - \tau) - m_{F(t - \tau)})) \right| \quad (1)$$

где $F(t)$ – исследуемая функция;

n – количество точек значений функции $F(t)$, $\sigma_{F(t)}^2$ и $m_{F(t)}$ – дисперсия и математическое ожидание исследуемой функции;

τ – смещение времени.

Результаты автокорреляционного анализа приведены на рис. 3–5 в виде графиков нормированных автокорреляционных функций исследуемых процессов фазы C , т. е. той фазы, в которую вводилось возмущение. За начало отсчета принято реальное время начала эксперимента 11:48:46.

Графики автокорреляционных функций рассматриваемых процессов показали (рис. 3–5), что они являются стационарными по отношению к автокорреляционным функциям и обладают свойством эргодичности.

Экспериментально полученные графики автокорреляционных функций наиболее точно аппроксимируются выражением:

$$R_i(\tau) = \sigma_i^2 e^{-\lambda_i \tau} \cos \omega \tau. \quad (2)$$

Наличие периодических составляющих $\cos \omega \tau$ в автокорреляционных функциях свидетельствует о строгой периодичности случайных процессов. При этом частоты случайных колебаний около соответствующих математических ожиданий параметров ДСП совпадают с собственными инфранизкими частотами колебаний подвижных элементов короткой сети ДСП [9], определяемых по формуле:

$$\omega_{c_i} = \sqrt{\frac{c_i}{m_i}}, \quad (3)$$

где c_i – жесткости стальных пружин (сердечников кабелей);

m_i – массы кабельных проводников с изоляцией и шлангами с водой.

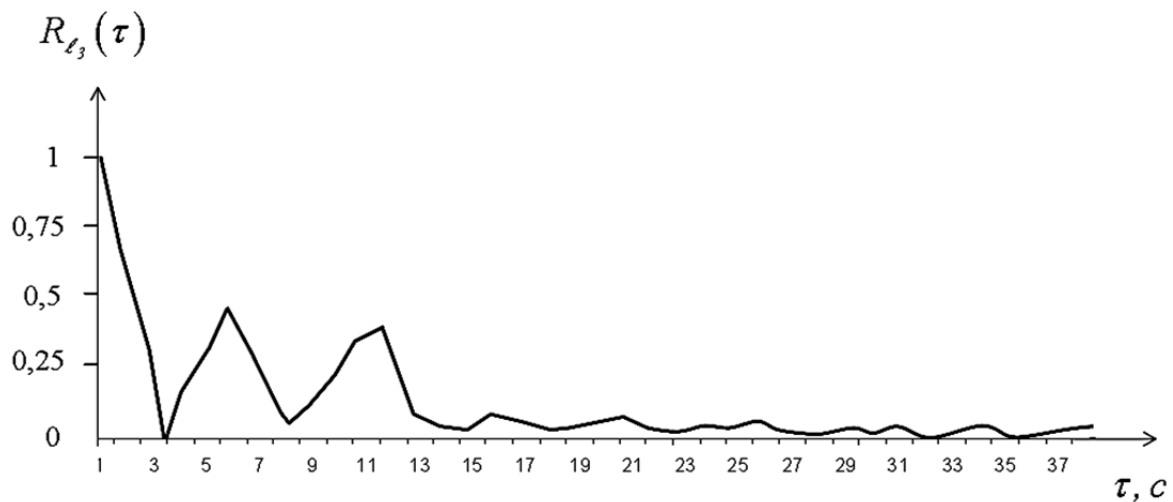


Рис. 3. График автокорреляционной функции $R_{l_3}(\tau)$ процесса $l_3(t)$ фазы C

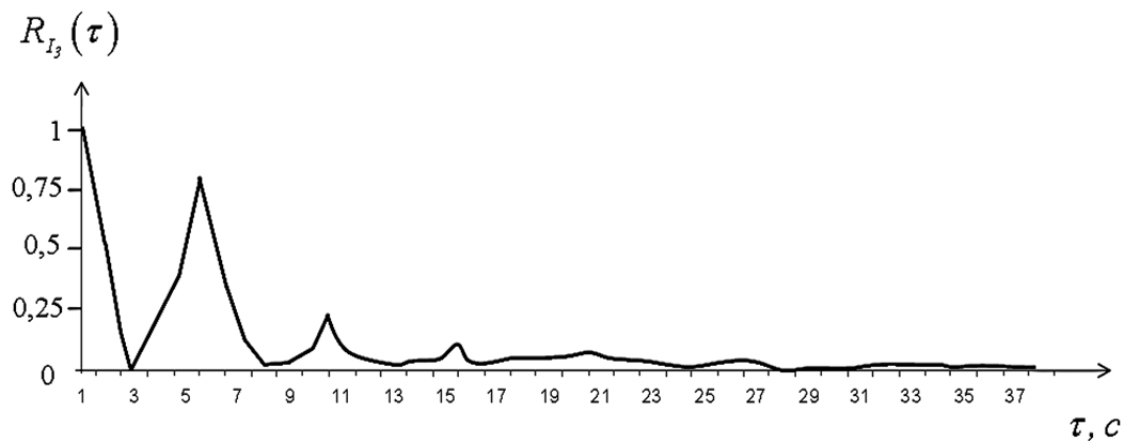


Рис. 4. График автокорреляционной функции $R_{I_3}(\tau)$ процесса $I_3(t)$ фазы C

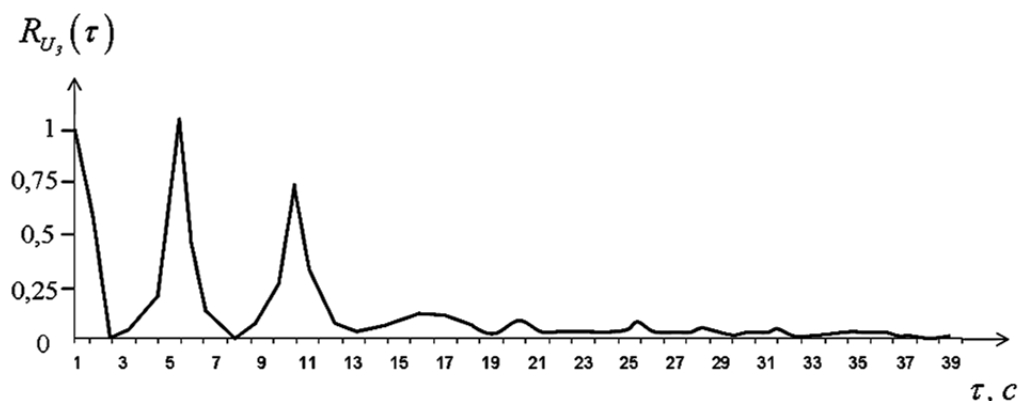


Рис. 5. График автокорреляционной функции $R_{U_3}(\tau)$ процесса $U_3(t)$ фазы C

Частоты собственных колебаний подвижных элементов коротких сетей ДСП12, ДСП50, ДСП100, как было замечено ранее, находятся в пределах:

$$f_{c_i} = \frac{\omega_{c_i}}{2\pi} \approx 0,15 \dots 0,6 \text{ Гц.} \quad (4)$$

Из рис. 2 при эксперименте было установлено, что частота колебаний гибкого кабеля ДСП-50 составляет 0,2 Гц.

В этих же интервалах находятся и частоты периодических колебаний длин дуг, токов и напряжений, определенных автокорреляционным анализом:

$$f_{c_i} = \frac{1}{T_\ell} = \frac{1}{T_I} = \frac{1}{T_U} \approx 0,2 \text{ Гц,} \quad (5)$$

где T_ℓ , T_I , T_U – периоды колебаний токов, напряжений, длин дуг на графиках автокорреляционных функций (рис. 3–5).

Это указывает на связь параметров модулированных колебаний электрических параметров ДСП с электродинамическими свойствами подвижных элементов короткой сети, поскольку принудительные механические колебания гибкого кабеля одной из фаз привели к колебаниям той же частоты фазных токов, напряжений и длин дуг в этой и других фазах.

Для доказательства того, что колебания электрических параметров и, как следствие, длин дуг, то есть электродов, вызваны принудительным колебанием гибкого кабеля, необходимо оценить пропорциональную связь между ними.

Рассмотрим взаимосвязь изменения тока фазы C и угла отклонения гибкого кабеля фазы C при внешнем возмущении во время эксперимента.

Если угол отклонения кабеля фазы C увеличивается, то расстояние между кабелями фаз также увеличивается, что приводит к уменьшению взаимных индуктивностей, и ток при этом должен увеличиваться. Уменьшение импеданса отрабатывается регулятором так, что привод перемещения электрода восстанавливает задание, т. е. поднимает электрод и, как следствие, увеличивается длина дуги. И наоборот, если угол отклонения кабеля уменьшается, то ток в этой фазе и длина дуги должны уменьшаться.

Для оценки пропорциональной связи между электрическими параметрами фазы C и углом отклонения кабеля фазы C применяется аппроксимация функции по исходным табличным данным и определение величины достоверности, осуществляемая с помощью метода наименьших квадратов в стандартной программе Microsoft Excel.

На рис. 2 выбираем 2 интервала времени, в одном из которых длина дуги фазы C уменьшается, а в другом – увеличивается. Строим зависимости изменения длины дуги фазы C от угла отклонения гибкого кабеля фазы C на двух этих интервалах по таблицам данных.

На рис. 6 и 7 приведены графики зависимости длины дуги фазы C от угла отклонения гибкого кабеля фазы C от вертикали при увеличении значения длины дуги и при уменьшении.

С помощью аппроксимации функции по исходным точкам в программе Microsoft Excel было определено уравнение аппроксимированной прямой:

$$l_c(\varphi_c) = 0,8105\varphi_c + 213,56. \quad (6)$$

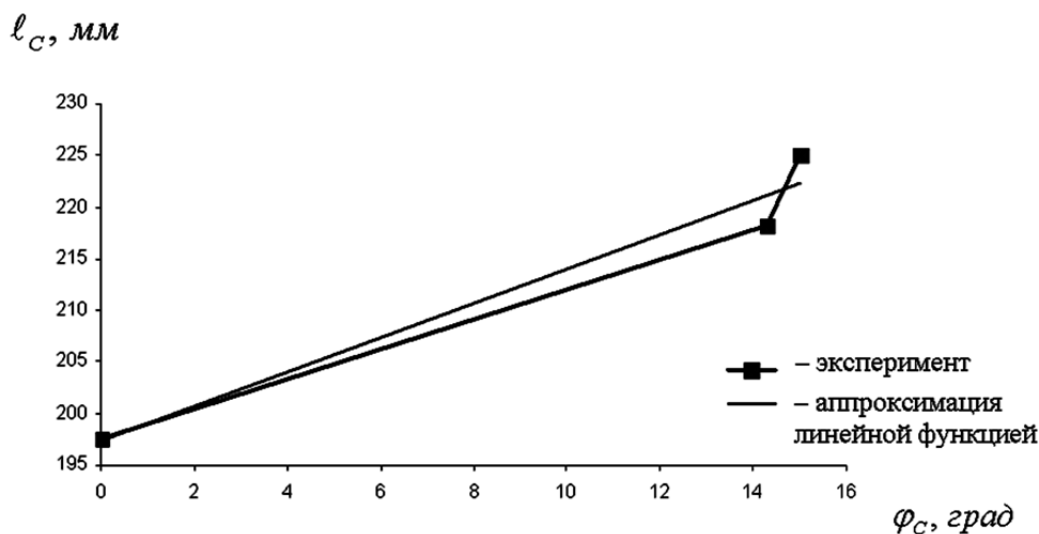


Рис. 6. Графики зависимостей длины дуги фазы C от угла отклонения гибкого кабеля фазы C от вертикали при увеличении длины дуги

Величина достоверности, то есть приближенности к линейной зависимости, составила:

$$R^2 = 0,988. \quad (7)$$

Таким образом, погрешность составляет 1,2 % и не выходит за пределы 5 %.

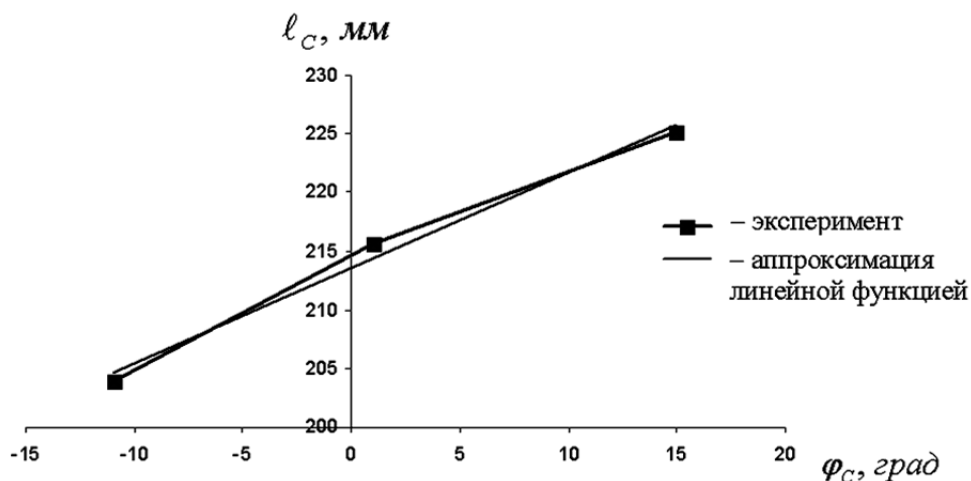


Рис. 7. Графики зависимостей длины дуги фазы C от угла отклонения гибкого кабеля фазы C от вертикали при уменьшении длины дуги

С помощью аппроксимации функции по исходным точкам в программе Microsoft Excel было определено уравнение аппроксимированной прямой:

$$l_c(\varphi_c) = 1,6657\varphi_c + 197,37. \quad (8)$$

Величина достоверности, то есть приближенности к линейной зависимости, составила:

$$R^2 = 0,9616. \quad (9)$$

Таким образом, погрешность составляет 3,84 % и не выходит за пределы 5 %.

Разброс экспериментальных точек зависимости длины дуги фазы C от угла отклонения гибкого кабеля фазы C от вертикали, не выходит за пределы 5 %, значит функции данных зависимостей можно считать линейными. Это указывает на то, что электромеханическая система с помощью регуляторов перемещения электродов отрабатывает внешние электродинамические возмущения. Линейность зависимостей изменения тока фазы от угла отклонения кабеля от вертикали и изменения длины дуги фазы от угла отклонения кабеля от вертикали является одним из признаков адекватности разработанных в [2, 3] моделей.

ВЫВОДЫ

Автокорреляционный анализ процессов изменения токов, напряжений и длин дуг при экспериментальных возмущениях показал, что частоты их флуктуаций совпадают с собственными частотами колебаний гибких кабелей, что указывает на них как на источник возмущений с инфранизкими частотами. Это дает возможность обоснованно выбрать направление оптимизации импедансных регуляторов перемещения электродов.

Оценкой линейных пропорциональных зависимостей изменения длины дуги фазы от угла отклонения кабеля установлено, что одной из причин нестабильной работы системы управления приводом перемещения электродов являются электродинамические колебания кабелей, что подтверждает полученные ранее результаты теоретических исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панкратов А. И. Исследование электромеханических колебаний гибких кабелей дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Сб. научных трудов ДонГТУ : Наукові праці Донецького національного технічного університету, 2009. – Вып. 9(158). – С. 179–185. – (Серия «Электротехника і енергетика»).
2. Панкратов А. И. Оценка электромеханических возмущений в силовых цепях дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 при эксплуатационных коротких замыканиях / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Вестник Кременчугского Национального технического университета. – Кременчуг, 2009. – Вып. 3, ч. 1. – С. 231–234.
3. Панкратов А. И. Оценка адаптивности регуляторов мощности дуговых сталеплавильных печей к внешним возмущениям / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2010. – Вып. 28. – С. 462–463. – (Серия «Электротехника, электроника и электропривод»).
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 / Тесля Н. Б. ; Новосибирский гос. индустр. ун-т. – Новосибирск, 1998. – 198 с.
5. Kadar I. I. The influence of cable swings on the electrical parameters of flexible cables / I. I. Kadar, P. P. Biringer. – Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. : Pap. Ind. Appl. Conf. 25 th, Seattle, Wash., Oct. 7–12, 1990. – P. 2031–2035.
6. Ситуаційне керування в дугових сталеплавильних печах : монографія / Л. Д. Костинюк, А. О. Лозинський, О. Ю. Лозинський, А. В. Маляр, Я. Ю. Марущак, Я. С. Паранчук, В. Я. Перевознюк, Я. Б. Сметанюк ; за ред. О. Ю. Лозинського, Я. Ю. Марущака. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2004. – 382 с.
7. Панкратов А. И. Автокорреляционный анализ флуктуаций электрических параметров дуговых сталеплавильных печей / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Материалы VII Междунар. конф. «Стратегия качества в промышленности и образовании» 3–10 июня 2011 г., Варна, Болгария в 3-х томах. Том I I. – С. 203–206.