

А.А. Власов, С.В. Зданевич

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ БАЛАНСИРНОГО ЭЛЕКТРОДОДЕРЖАТЕЛЯ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

*Анотація. Розглядається динамічна система балансірного електродотримача дугової трифазної сталеплавильної печі на основі подвійного фізичного маятника з пружнодисипативними зв'язками. Визначено параметри динамічної моделі та електродинамічного впливу вимушених коливань. Складено диференціальні рівняння змушених коливань дисипативної системи з двома ступенями волі. Виконано математичне моделювання вимушених і вільних коливань електрода в горизонтальній площині.*

*Ключові слова: балансірний електродотримач, динамічна система, електродинамічний вплив, коливання, амплітуда.*

### Вступление

При эксплуатации сверхмощных трехфазных дуговых сталеплавильных печей (ДСП), отмечен повышенный расход графитовых электродов в результате их поломок из-за ударного или изгибного нагружения, а также интенсивного вибрационного нагружения электрододержателей при действии электродинамических сил [1]. Электродинамическое взаимодействие токоподводов электрододержателей и электродов соседних фаз при рабочих токах плавки или в режимах коротких замыканий (КЗ), возбуждает изгибно-крутильные колебания в системе «электрод - электрододержатель - стойка». Это приводит к пространственному перемещению электрода. Вынужденные колебания или автоколебательные процессы в динамической системе электрододержателя могут происходить с амплитудами, превышающими предельные по прочности материала электрода и его ниппельных соединений [2].

### Постановка проблемы

Механические колебания электродов в системе электрододержателей трехфазных ДСП влияют на процесс плавки и могут привес-

ти к разрушению электродов, поэтому следует считать актуальными исследования, направленные на совершенствование конструкций системы электрододержателей путем использования новых конструктивных решений с системами виброзащиты, рациональным выбором динамических параметров механической системы электрододержателей и применения устройств для демпфирования колебаний несущей электрод металлоконструкции.

#### **Анализ последних исследований и публикаций**

Среди известных технических решений, направленных на снижение амплитуд колебаний электрододержателей ДСП, являются упругодемпферные роликовые опоры подвижных стоек, а также гасители колебаний, устанавливаемые на различных участках рукавов электрододержателей. Однако эти решения не позволяют снизить амплитуды колебания до приемлемого уровня по причине неподвижного соединения рукава электрододержателя с несущей стойкой. При таком соединении система электрододержателя отличается большой жесткостью при крайне малой диссипации.

В работе А.И. Сапко [3] для исследования свободных затухающих и вынужденных колебаний электрододержателя в горизонтальной плоскости предложена динамическая модель электрододержателя с жестким креплением рукава в виде одномассовой крутильной системы.

Для снижения амплитуд колебаний электрода предлагалось [4] применить крепление электрододержателя к стойке двумя шарнирными узлами, с вертикальной и горизонтальной осью вращения, и упругодемпферными элементами.

Система балансирного электрододержателя представляет собой колебательную систему типа двойного физического маятника [5] расположенного в горизонтальной плоскости с упругими связями между звеньями [6, 7] и демпфирующими элементами [8].

Для системы балансирного электрододержателя в работе [9] предложен алгоритм расчета координаты расположения шарнира рукава электрододержателя и выбора рационального значения жесткости упругих элементов гасителя колебаний при статическом действии максимальных электродинамических сил на элементы токопроводящего контура электрододержателя при условии минимального откло-

нения электрода от исходного положения в горизонтальной плоскости.

### Постановка задачи

Разработать математическую модель и определить параметры динамической системы балансирующего электрододержателя ДСП. Выполнить сравнительную оценку максимальных амплитуд и характера вынужденных и свободных затухающих колебаний электрода после сброса электродинамической нагрузки для балансирующего электрододержателя и электрододержателя с жестким креплением рукава к стойке.

### Основной материал исследований

Принимаем металлоконструкцию горизонтальной части стойки и рукав электрододержателя с электродом твердыми телами с соответствующими инерционными параметрами.

Для сравнительного исследования приняты две расчетные схемы (рис.1): исходная с жестким креплением электрододержателя к стойке (рис.1, а) и балансирующего электрододержателя с шарнирным креплением рукава к стойке и упруго-демпферными узлами (рис.1, б), где  $m_{st}$ ,  $I_{stz}$ ,  $c_1$  – соответственно масса, момент инерции относительно вертикальной оси и крутильная жесткость стойки;  $m_r$ ,  $I_{rz}$  – соответственно масса и момент инерции рукава относительно вертикальной оси;  $L_e$ ,  $d_e$ ,  $m_e$ ,  $I_{ez}$  – соответственно длина, диаметр, масса и момент инерции электрода относительно вертикальной оси;  $c_{gk}$ ,  $\lambda_{gk}$  – соответственно жесткость упругих элементов и коэффициент поглощения гасителя колебаний;  $L_1$ ,  $L_2$  – координаты расположения шарнира рукава и гасителя колебаний относительно оси стойки;  $L_{r1}$ ,  $L_{r2}$  – геометрические размеры участков рукава.

Для исследования малых колебаний электрода в горизонтальной плоскости составлена приведенная двухмассовая динамическая система балансирующего электрододержателя (рис.2, а). Стойка 1 условно шарнирно закреплена (т.О1). Крутильная жесткость стойки  $c_1$  электрододержателя приведена к шарниру (т.В) на основании равенства потенциальных энергий

$$c_{st} = c_1 \cdot (\delta\varphi_1 / \delta s_B)^2 = c_1 / L_2^2. \quad (1)$$

Рукав электрододержателя 2 шарнирно закреплен на стойке (т.В) и опирается (т.А) на упругие элементы гасителя колебаний. Упругие элементы гасителя колебаний в исходном состоянии не дефор-

мированы. Параллельно упругим элементам установлены демпферы, создающие вязкое сопротивление. Сопротивление от сил трения в шарнире (т.В) не учитываем.

За обобщенные координаты приняты угловые перемещения:  $\varphi_1$  - стойки;  $\varphi_2$  - рукава электрододержателя. Положительные направления обобщенных координат (рис.2, б) приняты от положения равновесия ( $\varphi_1 = 0$ ,  $\varphi_2 = 0$ ) по часовой стрелке.

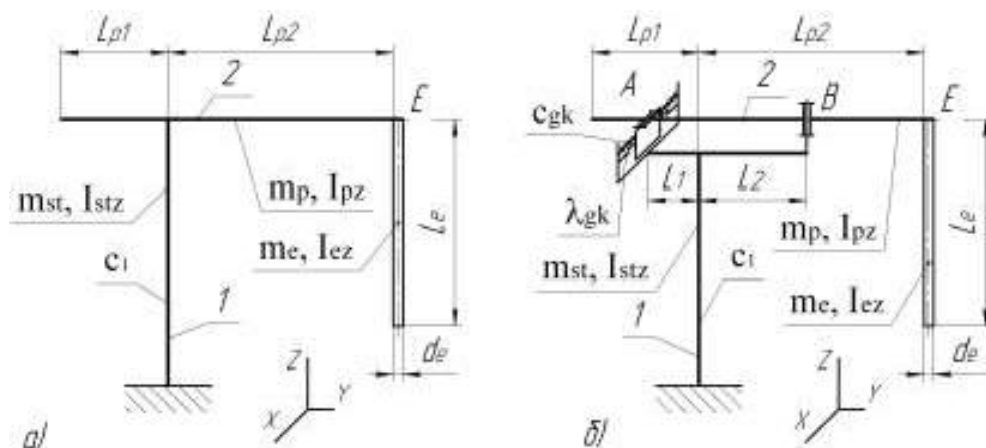


Рисунок 1 - Расчетная схема системы «стойка - электрододержатель - электрод»: а) с жестким креплением электрододержателя к стойке; б) балансирующего электрододержателя с шарнирным креплением рукава к стойке и упруго-демпферными узлами (1- стойка; 2- рукав с электродом)

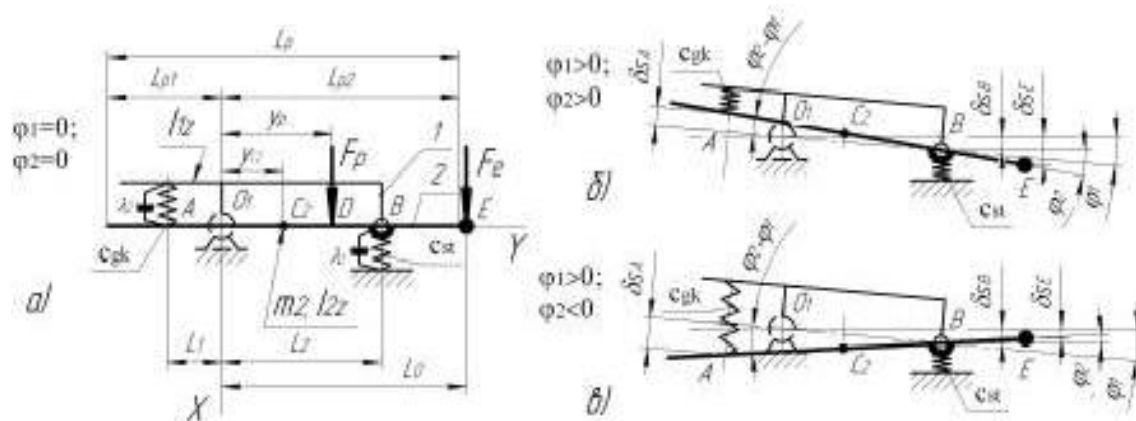


Рисунок 2 - Приведенная двухмассовая динамическая модель балансирующего электрододержателя: а) исходное положение ( $\varphi_1 = 0$ ,  $\varphi_2 = 0$ ); б) первая форма колебаний ( $\varphi_1/\varphi_2 > 0$ ); в) вторая форма колебаний ( $\varphi_1/\varphi_2 < 0$ )

На основании уравнений Лагранжа второго рода дифференциальные уравнения малых вынужденных колебаний в диссипативной системе с двумя степенями свободы имеют вид [4]

$$\left. \begin{aligned} a_{11} \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{12} \cdot \ddot{\varphi}_2 + b_{11}\dot{\varphi}_1 + b_{12}\dot{\varphi}_2 + c_{11} \cdot \varphi_1 + c_{12} \cdot \varphi_2 = Q_1 \\ a_{21} \cdot \ddot{\varphi}_2 + a_{22} \cdot \ddot{\varphi}_1 + b_{21}\dot{\varphi}_1 + b_{22}\dot{\varphi}_2 + c_{21} \cdot \varphi_1 + c_{22} \cdot \varphi_2 = Q_2 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $a_{js}$ ,  $b_{js}$ ,  $c_{js}$  - соответственно инерционные, диссипативные и квазиупругие коэффициенты;  $Q_s$  - обобщенная сила;  $j = 1, 2$ ;  $s = 1, 2$ .

На основании кинетической и потенциальной энергии, а также диссипативной функции колебательной системы, инерционные, квазиупругие и диссипативные коэффициенты в уравнениях (1) примут вид:

$$a_{11} = I_{1z} + m_2 L_2^2; \quad a_{12} = a_{21} = m_2 L_2 b; \quad a_{22} = I_{2c_2} + m_2 b^2. \quad (3)$$

$$\begin{aligned} c_{11} = c_{st} L_2^2 + c_{gk} (L_1 + L_2)^2; \quad c_{12} = c_{21} = -c_{gk} (L_1 + L_2)^2; \\ c_{22} = -c_{12}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} b_{11} = \lambda_1 L_2^2 + \lambda_2 (L_1 + L_2)^2; \quad b_{12} = b_{21} = -\lambda_2 (L_1 + L_2)^2; \\ b_{22} = -b_{12}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $m_2 = m_p + m_e$ ;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - коэффициенты неупругих сопротивлений.

Потенциальная энергия системы имеет в положении равновесия ( $\varphi_1 = 0$ ,  $\varphi_2 = 0$ ) минимум, следовательно, равновесие системы в данном положении будет устойчивым.

Обобщенные силы  $Q_1$  и  $Q_2$ , отвечающие суммарному электродинамическому воздействию на рукав и электрод от равнодействующих сил  $F_p$  и  $F_e$  составят:

$$Q_1 = (F_p + F_e) L_2; \quad Q_2 = -F_p (L_2 - y_p) + F_e (L_0 - L_2) \quad (6)$$

Электродинамические нагрузки в системе являются функцией времени и зависят от конфигурации контура, токов взаимодействующих фаз и принимают максимальные значения при ударных токах КЗ. Для оценки максимального вынуждающего электродинамического воздействия принимаем, что рукава электрододержателей триангулированного токоподвода ДСП расположены в одной горизонтальной плоскости [9].

Максимальное усилие на рукав электрододержателя при взаимодействии с токами соседних фаз

$$F_{p \max} = 10^{-7} \cdot k_p \cdot I^2, \quad (7)$$

где  $k_p$  – геометрический коэффициент контура токов взаимодействующих фаз;  $I$  – ударный ток КЗ.

Равнодействующая сила от равномерно распределенной электродинамической нагрузки при взаимодействии в трехфазной системе электродов, расположенных по углам равностороннего треугольника со стороной  $a_e$ , приведена к вертикальной плоскости, которая перпендикулярна оси рукава электрододержателя, и принимает максимальные значения при токах КЗ

$$F_{e \max} = 10^{-7} \cdot k_{KZ} \cdot k_{pr.e} \cdot \frac{L_e}{a_e} \cdot I^2, \quad (8)$$

где  $k_{KZ}$  – коэффициент, который зависит от вида КЗ  $k_{pr.e}$  – коэффициент приведения к плоскости нормальной к оси рукава;  $a_e$  – расстояние между электродами;  $L_e$  – рабочая длина электрода.

При моделировании колебаний электрододержателя с учетом синусоидального характера изменения тока в трехфазной сети электродинамическая нагрузка принята в виде

$$F_e(t) = F_{e \max} \cdot \sin^2(\omega t), \quad F_p(t) = F_{p \max} \cdot \sin^2(\omega t) \quad (9)$$

где  $\omega$  – угловая частота переменного тока ( $\omega = 314$  с-1).

Для конструкции электрододержателя с жестким креплением рукава к стойке дифференциальное уравнение вынужденных колебаний диссипативной системы с одной степенью свободы:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = Q/I_{np} \quad (10)$$

здесь обобщенная сила  $Q = F_e L_0 + F_p y_p$ ; собственная частота свободных колебаний  $k = \sqrt{c_1/I_{np}}$ ; коэффициент затухания  $n = 0,5 \lambda_1/I_{np}$ , где приведенный к оси стойки электрододержателя момент инерции системы  $I_{np} = I_{1z} + I_{2z}$ .

Крутильная жесткость стойки электрододержателя с учетом приведенной жесткости  $c_{rol}$  узла верхних опорных роликов (рис.3, а)

$$c_1 = c_b (c_a + c_{rol}) / (c_a + c_b + c_{rol}) \quad (11)$$

здесь крутильные жесткости участков стойки (рис.3, а): над верхними опорными роликами  $c_a(L_e) = GJ_{st} / (L_{st0} + L_e - L_{e \min})$ , между верхними и нижними опорными роликами  $c_b = GJ_{st} / L_{rol}$ , где  $G$  – модуль упругости второго рода;  $J_{st}$  – полярный момент инерции сечения

стойки;  $L_{st0}$  – минимальная длина вертикального участка стойки;  $L_{e \min}$  – минимальная длина рабочей части электрода;  $L_{rol}$  – длина участка стойки между верхними и нижними опорными роликами.

Стойка электрододержателя относительно оси  $Z$  может иметь симметричную линейную (рис.3, б) или кусочно-линейную упругую характеристику (рис.3, в) в зависимости от упругой характеристики узла верхних опорных роликов.

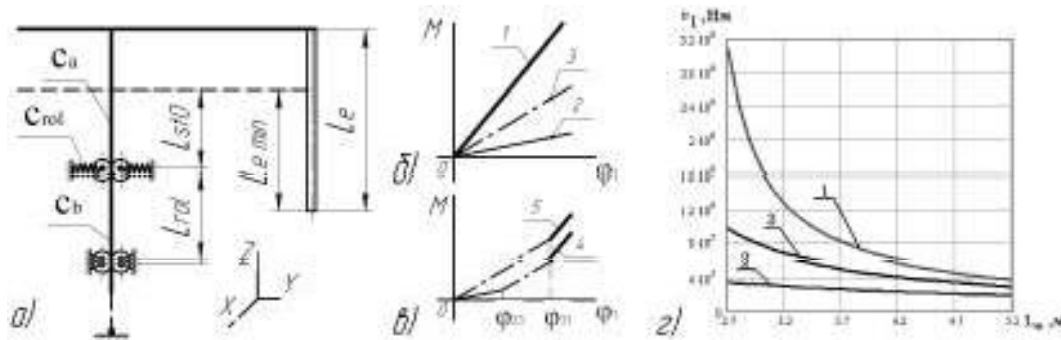


Рисунок 3 - Стойка электрододержателя (а), линейная (б) и кусочно-линейная (в) упругая характеристика при условном заземлении:  
 1 - в верхних опорных роликах; 2 - в нижних опорных роликах;  
 3 - с учетом линейной жесткости узла верхних опорных роликов;  
 4 - с зазором ( $\varphi 23$ ) и 5 - с жестким упором ( $\varphi 31$ ) в узле опорных роликов; крутильная жесткость ( $\gamma$ ) стойки электрододержателя ДСП-50Н2 в функции рабочей длины электрода

Масса электрода и момент инерции электрода относительно вертикальной центральной оси

$$m_e = 0,25 \cdot \rho \cdot \pi d_e^2 \cdot (L_e + \Delta L_e), \quad I_e = 0,125 \cdot m_e \cdot d^2 \quad (12)$$

где  $\rho$ ,  $d_e$ ,  $L_e$  и  $\Delta L_e$  соответственно плотность материала, диаметр, длина рабочей части и хвостовика электрода.

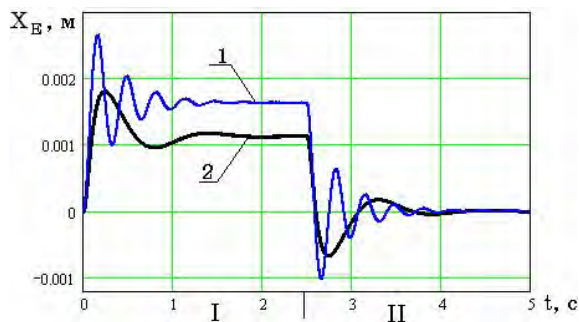
Для системы электрододержателей ДСП-50Н2 в работе [9] приведены расчетные данные по максимальным значениям сосредоточенной электродинамической нагрузки на электрод (в диапазоне изменения его рабочей длины) и рукав крайнего электрододержателя при различных вариантах КЗ для максимального тока КЗ (73 кА), зарегистрированного при экспериментальных исследованиях.

На основе систем уравнений (2) и (10) при нулевых начальных условиях выполнено моделирование колебаний электрода при приложении электродинамической нагрузки и после ее сброса в системе с жестким и шарнирным креплением рукава электрододержателя к

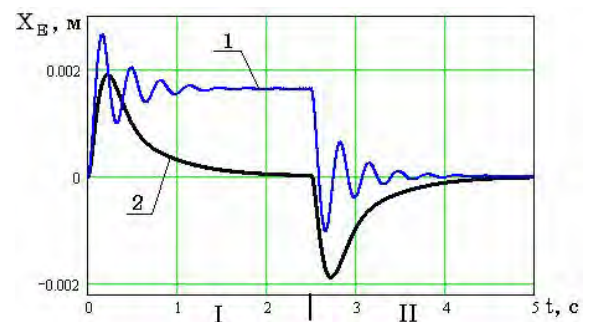
стойке. Координата положения электрода  $x_E$  (рис.4) при колебаниях системы: для исходной конструкции электрододержателя  $x_E = \varphi L_0$ ; для балансирующего электрододержателя  $x_E = \varphi_1 L_2 + \varphi_2 (L_0 - L_2)$ .

Для крайнего электрододержателя ДСП-50Н2 приняты для расчета геометрические размеры рукава и электрода:  $L_1 = 0,6$  м;  $L_2 = 2,85$  м;  $L_{p1} = 1,65$  м;  $L_{p2} = 4,045$  м;  $d_e = 0,5$  м;  $L_e = 2,7 \div 5,0$  м;  $\Delta L_e = 0,4$  м. Инерционные параметры колебательной системы:  $I_{1z} = 984$  кгм<sup>2</sup>;  $m_p = 5450$  кг;  $I_p = 14730$  кгм<sup>2</sup>;  $I_{2z} = 56469$  кгм<sup>2</sup>.

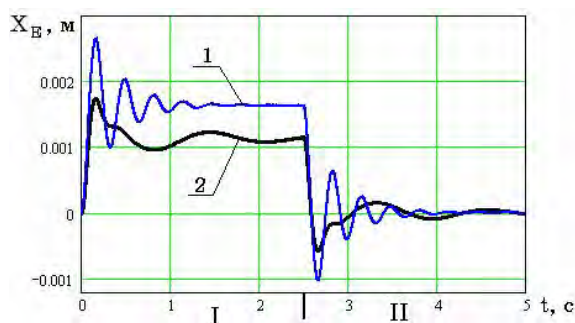
Моделирование колебаний электрода выполнялось при расчетных параметрах соответствующих средней рабочей длине электрода  $L_e = 3,85$  м, крутильной жесткости стойки  $c_1 = 22$  МНм и коэффициенте сопротивления  $\lambda_1 = 23 \cdot 10^3$  кг/с. Электродинамические силы, действующие на электрод и рукав электрододержателя, определялись при максимальном токе двухфазного КЗ (73 кА).



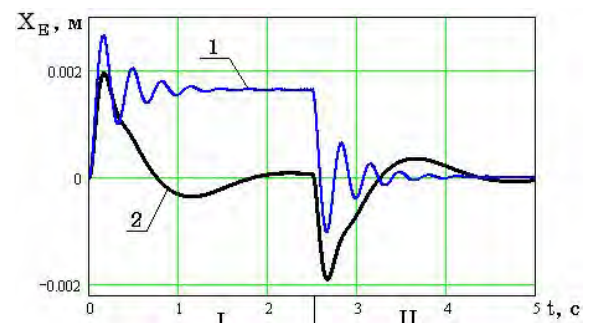
а)  $cgk = 85,44$  кН/м;  $\lambda_2 = 18 \cdot 10^3$  кг/с



в)  $cgk = 26,11$  кН/м;  $\lambda_2 = 18 \cdot 10^3$  кг/с



б)  $cgk = 85,44$  кН/м;  $\lambda_2 = 8 \cdot 10^3$  кг/с



г)  $cgk = 26,11$  кН/м;  $\lambda_2 = 8 \cdot 10^3$  кг/с

Рисунок 4 - Вынужденные колебания (участок I) электрода при действии электродинамического воздействия на систему «электрододержатель-электрод» и затухающие свободные колебания (участок II) электрода после сброса нагрузки при изменении параметров жесткости и диссипации гасителя колебаний: 1 - жесткая конструкция электрододержателя; 2 - балансирующий электрододержатель



Результаты моделирования (рис.4) вынужденных колебаний электрода при действии электродинамического воздействия с постоянной амплитудой на систему «электрододержатель-электрод» и затухающих свободных колебаний после сброса нагрузки указывают на возможность снижения максимальной амплитуды колебаний (рис.4, а, б) электрода при определенных значениях жесткости и коэффициента сопротивления гасителя колебаний.

### Выводы

Предложенная математическая модель динамической системы балансирного электрододержателя с упругодемпферными узлами позволяет исследовать колебания электрода в горизонтальной плоскости. Моделирование вынужденных и свободных колебаний электрода в системе балансирного электрододержателя ДСП-50Н2 показало возможность снижения максимальных амплитуд и изменения характера колебаний электрода при рациональном выборе значений жесткости и параметров диссипации гасителя колебаний, что может быть предметом дальнейших исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Коваль М.В. Про підвищення надійності роботи електродів дугових сталеплавильних печей / М.В. Коваль, В.К. Тарасов, С.С. Пилипенко, Ю.П. Єгоров, А.О. Власов // *Металургія: Збірник наукових праць ЗДІА. - Запоріжжя: ЗДІА, 2016. - Вип. 35. - С. 58-62.*
2. Eugenio G.M. Brusa Design and Structural Optimization of the Electric Arc Furnace Through a Mechatronic-Integrated Modeling Activity / Eugenio G.M. Brusa, Stefano Morsut // *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol.20, No 3, June 2015. - pp. 1099-1107.*
3. Сапко А.И. Исполнительные механизмы регуляторов мощности дуговых электропечей.- М.: Энергия, 1980. - 136 с.
4. Патент на винахід №43610А Україна, МПК Н 05 В 7/10. Пристрій для кріплення електродотримача дугової сталеплавильної печі / Власов А.О., Коваль М.В., Жук А.Я., Лебедева І.В., Беляев С.Ю., Бейник В.В.; заявник і власник Запорізька державна інженерна академія. - № 2001042291; заявл. 06.04.2001; опубл. 17.12.2001, Бюл.№11.
5. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики. Часть 2. Динамика системы материальных точек. - М.: Наука. Главн. ред. физ.-мат. лит., 1966. - 332 с.
6. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний: Учебное пособие для вузов.- М.: Наука. Главн. ред. физ.-мат. лит., 1991. - 256 с.
7. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. - М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 304 с.
8. Циглер Г. Основы теории устойчивости конструкций: Пер. с англ. - М.: Мир, 1971. - 191 с.
9. Власов О.А. Вибір жорсткості пружних елементів гасителя коливань балансирного електродотримача дугової сталеплавильної печі / О.А. Власов, С.В. Зданевич // *Теорія і практика металургії, 2017. №1-2, С.77-81.*