

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Власова Андрія Олександровича** «Вдосконалення механічної системи електродотримачів дугової сталеплавильної печі для зменшення вібрацій електродів»,

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.08 - Машини для металургійного виробництва

1. Актуальність теми. Важливою задачею сучасної електрометалургії України є зменшення собівартості сталі, де одним із напрямків є зменшення витрат графітованих електродів. Однією з причин витрати електродів є їх руйнування при вібраційному навантаженні з характеристиками коливань, що перебільшують граничні значення з умови міцності. Існує два основних підходи до зменшення витрати графітованих електродів при вібраційному навантаженні. Перший з них заснований на підвищенні якості електродів, зокрема механічних властивостей матеріалу електроду. Другий передбачає зменшення навантаження на електрод за рахунок вдосконалення механічної системи електродотримачів (МСЕ) та раціонального вибору їх параметрів. МСЕ надпотужних дугових сталеплавильних печей (ДСП) відносяться до складних в конструктивному і відповідальних у виробничому відношенні агрегатів. Зменшення вібрацій електродів ДСП є комплексна проблема, яка пов'язана з нестационарним електродинамічним навантаженням в просторовій системі електродотримачів і електродів, а також динамічними параметрами МСЕ та характеристиками дисипації, що підтверджує актуальність досліджень.

2. Ступінь обґрунтованості та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. В основі отриманих наукових і прикладних результатів роботи лежать базові залежності і аналітичні методи теоретичної механіки, теорії коливань. Обґрунтованість наукових положень дисертації забезпечується математичними моделями, які відповідають сучасним науковим уявленням про електродинамічну взаємодію між провідниками, в просторовій системі короткої мережі ДСП, що пов'язані з елементами механічної системи електродотримачів, і коливальні процеси у динамічних механічних системах з урахуванням пружності їх елементів. Адекватність математичних моделей динамічних систем електродотримачів також підтверджується збіжністю результатів імітаційного моделювання коливань електродотримача з експериментальними даними отриманими на діючій МСЕ ДСП-50Н2. Математичне моделювання здійснювалось загальноновизнаними чисельними методами на ПЕОМ.

Достовірність наукових результатів підтверджується коректністю постановки задач на підставі всебічного аналізу розрахункових схем електродотримачів ДСП і узгодженості вихідних даних, застосуванням апробованих теоретичних методів з урахуванням загальноприйнятих та обґрунтованих припущень.

Тому вважаю **сформульовані в роботі наукові положення, висновки і рекомендації в достатньому ступені обґрунтованими і достовірними** які відповідають сучасним уявленням про предмет дослідження.

3. Новизна наукових положень, результатів і рекомендацій. Наукова цінність результатів роботи полягає в тому, що в ній вперше при розрахунку динамічних параметрів механічної системи електродотримача з рухомою стійкою

запропоновано призначати граничні обмеження параметрів вібрації рукава електродотримача з умов міцності графітованого електроду та його ніпельних з'єднань з урахуванням зміни механічних характеристик їх матеріалів при дії температури.

Вперше, за умови заданого граничного значення амплітуди коливань електроду у горизонтальній площині, отримані аналітичні залежності для визначення раціонального значення координат розташування шарнірів рукава балансірного електродотримача (БЕ) та жорсткості пружного елемента гасителя коливань з урахуванням варіації максимального електродинамічного навантаження у можливих режимах коротких замикань, конструктивних параметрів рукава електродотримача та діапазону зміни крутильної жорсткості рухомої стійки.

Важливим науковим результатом отриманим в роботі є теоретично обґрунтована та підтверджена моделюванням, на основі математичної моделі динамічної системи БЕ з шарнірним кріпленням рукава до рухомої стійки, можливість зменшення складових амплітуди коливань електродотримача у горизонтальній площині в 1,43...1,71 рази при заданому співвідношенні жорсткості елементів гасителя коливань рухливого шарніру рукава та крутильної жорсткості рухомої стійки, що відповідає робочій довжині електроду.

4. Цінність для науки і практики результатів досліджень. Наукове і практичне значення роботи складається в розробці математичної моделі динамічної системи БЕ та алгоритмів для імітаційного моделювання її коливань у горизонтальній площині при варіації нестационарного електродинамічного збурення, що дозволяє визначити закони і режими коливань електрода з урахуванням динамічних параметрів системи у функції робочої довжини електрода та положення рухомої стійки МПЕ.

Розроблено інженерну методику вибору місця встановлення пружно-демпферних елементів механічної системи БЕ та раціонального визначення їх жорсткості і характеристики дисипації, з урахуванням динамічних параметрів електродотримача і заданого діапазону нестационарного електродинамічного впливу при зміні геометричних параметрів електродів, за умови коливань електроду в горизонтальній площині з мінімальними амплітудами

Значущість практичних результатів підтверджується актом впровадження технічних рішень та рекомендації в умовах ТОВ «УкрНДІЕлектротерм» і актом використання результатів дисертації у навчальному процесі Запорізької державної інженерної академії на кафедрі «Металургійного обладнання».

Отримані в роботі практичні рекомендації з удосконалювання МСЕ мають перспективу подальшого використання при конструюванні нових і модернізації існуючих МСЕ ДСП, де неодмінно буде реалізовуватися тенденція до зменшення витрат електродів за рахунок зменшення вібрацій та динамічних навантажень.

5. Повнота відображення наукових положень в опублікованих роботах

Основний зміст дисертації в повній мірі викладено у 18 наукових працях, в числі яких 8 статей у наукових фахових виданнях, затверджених ДАК МОН України, 2 з яких опубліковані у виданнях, що індексуються у науково-метричній базі Index Copernicus, 1 патенті України, 9-ти матеріалах праць і тез науково-технічних конференцій.

6. Оцінка змісту дисертації

Мета і задачі дисертаційного дослідження обумовлені необхідністю наукового обґрунтування раціональних геометричних розмірів і динамічних характеристик механічної системи балансируного електродотримача (БЕ) ДСП на основі дослідження впливу нестационарного електродинамічного збурення на просторові механічні коливання у системі, що дозволяє вирішити задачі зниження динамічних навантажень на електроди за рахунок зменшення їх вібрацій у горизонтальній площині. Задачі поставлені коректно і вирішуються в логічній послідовності починаючи від аналізу механічних характеристик та причин руйнування електродів, схематизації навантаження електродів, конструкцій механічних систем електродотримачів, експериментальних досліджень коливань електродотримача, до обґрунтування раціональної схеми БЕ та вибору його геометричних і динамічних параметрів.

У розділі 1 здобувач на основі літературного огляду теоретичних і експериментальних досліджень аналізує комплекс проблем пов'язаних з електромеханічними коливаннями МСЕ, які збурюються за рахунок електродинамічної взаємодії струмоведучих контурів трифазної ДСП, зокрема вібрацій та руйнування графітованих електродів. Розглядаються причини, що впливають на експлуатаційні витрати електродів. Відзначаються конструктивні особливості МСЕ, амплітудно-частотні характеристики їх динамічних систем та зв'язок напруженого стану електрода і його ніпельних з'єднань з низькочастотними коливаннями електродотримача в горизонтальній площині, які пов'язані з деформаціями крутіння та згинання рухомої стійки.

На підставі детального аналізу конструкцій і результатів відомих досліджень механічних систем електродотримачів здобувачем обґрунтовано поставлений ряд задач. При цьому ставиться мета досліджувати коливання електродотримача з аналізом можливих режимів посилення коливань електрода при дії електродинамічного збурення в трифазній системі ДСП, як це робили багато дослідників, але з урахуванням зміни динамічних параметрів коливальних систем електродотримачів обумовлених масою електрода, жорсткістю рухомої стійки, нестационарними режимами електродинамічного навантаження.

У результаті здобувач приходить до аргументованих висновків. У них відзначені задачі, дослідженню яких не приділялося достатньої уваги (підвищення вібростійкості МСЕ ДСП і зменшення амплітуд коливань електрода в горизонтальній площині за рахунок шарнірного кріплення рукава електродотримача, раціонального вибору геометричних, інерційних та пружних параметрів системи, пристроїв та характеристик демпфірування коливань та ін.).

У розділі 2 наведені загальні положення та математичні моделі електродинамічного навантаження струмоведучих елементів електродотримачів ДСП. Отримані аналітичні залежності для визначення коефіцієнтів струмоведучих контурів взаємодіючих триангульованих електродотримачів ДСП-50Н2 з урахуванням геометрії їх розташування. Виконана схематизація електродинамічного навантаження на електродотримач крайньої фази та електрод у режимах короткого замикання (КЗ) між фазами при максимальному струмі.

Розглянуті умови міцності графітованого електрода та його ніпельних з'єднань з урахуванням зміни механічних характеристик матеріалу при дії температури та розрахований діапазон граничних віброприскорень голівки електродотримача у функції робочої довжини електрода за умови міцності при згині графітованого електрода при спільній дії максимального розподіленого електродинамічного навантаження для різних режимів КЗ та сил інерції.

Автором запропоновано при рішенні задачі синтезу МСЕ встановити граничні обмеження характеристик вібрації електродотримача з урахуванням багатофакторного нестационарного зовнішнього збурення, динамічних параметрів системи, а також за виконання умов міцності графітованого електрода, **що є науковою новизною даної роботи.**

Розглянута геометрія мас, динамічні параметри і кінетика коливальної системи електродотримача з рухомою стійкою ДСП-50Н2. Автор цілком обґрунтовано виконав декомпозицію складної просторової коливальної системи електродотримача, що дозволило виділити кілька підсистем для частотного аналізу. При частотному аналізі згинальних і крутильних динамічних підсистем електродотримача встановлені характерні особливості, що можуть бути причиною підвищеної віброактивності при електродинамічному збуренні.

У розділі 3 виконані дослідження впливу конструктивних факторів і динамічних параметрів системи БЕ на показники вібраційної активності в перехідних режимах при дії нестационарних електродинамічних сил і в режимах вільних коливань. Розроблена динамічна та математична модель системи БЕ на підставі геометричних та динамічних параметрів електродотримача крайньої фази ДСП-50Н2. Прийняті допущення в моделі для опису складного електродинамічного навантаження досить коректні.

Запропонований алгоритм розрахунку координати розташування шарніру рукава БЕ і жорсткості пружних елементів гасителя коливань при квазістатичній дії максимальних електродинамічних сил (з урахуванням виду КЗ) на елементи струмоведучого контуру електродотримача за умови мінімального відхилення точки кріплення електрода від вихідного положення, **що є науковою новизною даної роботи.**

У роботі ретельно виконано дослідження частот власних коливань електродотримача вихідної конструкції та системи БЕ у діапазоні можливої зміни інерційних і пружних параметрів коливальної системи. Автором визначені підсистеми в яких можлива поява умов внутрішнього резонансу, при зближенні частоти власних згинальних коливань електрода з власними частотами парціальних систем електродотримача.

Представлено результати порівняльного дослідження коливань в горизонтальній площині електродотримача ДСП-50Н2 та системи БЕ. На основі розробленої математичної моделі досліджено основні закономірності коливань в системі БЕ при дії нестационарного електродинамічного збурення.

Для розробленої конструкції БЕ з шарнірним кріпленням рукава до рухомої стійки на основі математичної моделі динамічної системи, теоретично обґрунтована можливість зменшення складових амплітуди коливань електродотримача у горизонтальній площині в 1,43...1,71 рази при заданому співвідношенні жорсткості

елементів гасителя коливань рухливого шарніру рукава та крутильної жорсткості рухомої стійки відповідно робочій довжині електроду, що **представляє наукову новизну даної роботи.**

У розділі 4 запропоновано нове технічне рішення конструкції електродотримача ДСП з шарнірним кріпленням рукава до стійки та пружно-демпферними пристроями, що визнане винаходом та **представляє практичний результат даної роботи.**

Автором запропоновано для гасіння коливань рукава в горизонтальній площині у підсистемі БЕ застосувати демпфер сухого позиційного тертя на основі ортогонального клинового механізму з лінійними пружними елементами з початковим натягом. Розроблена математична модель динамічної підсистеми рукава БЕ з демпфером сухого позиційного тертя. Наведені результати лабораторних досліджень коливань на фізичній моделі БЕ з демпфером позиційного сухого тертя та отримані рекомендації по раціональному вибору геометричних параметрів його елементів. Отримані в даному розділі результати відкривають можливість для подальших досліджень та удосконалення конструкції БЕ та його вузлів.

У розділі 5 дисертації автор приводить задачі, методичку, апаратні засоби виміру і результати натурних досліджень системи електродотримачів ДСП-50Н2 в умовах ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А.М. Кузьміна» з реєстрацією струму вторинної мережі, кінематичних і силових характеристик гідравлічного приводу механізму переміщення електрода, коливань електродотримача в горизонтальній площині.

Кількісні дані частотних і амплітудних характеристик коливальних процесів МСЕ отриманих при проведенні натурального експерименту використані автором для одержання вихідних даних для аналізу коливань електродів у горизонтальній площині, ідентифікації динамічних систем і встановлення адекватності розрахункових математичних моделей.

По композиційній побудові робота представляє цільне дослідження, у якому вирішені питання зменшення вібрацій електродів на підставі вивчення причин руйнування електродів, їх навантаження, міцності та граничних характеристик вібрації, критичного аналізу конструкцій і відомих робіт з дослідження МСЕ ДСП, і на підставі цього поставлені задачі теоретичних досліджень, вивчена кінетика МСЕ, виконаний динамічний аналіз коливальної системи електродотримача, експериментальні та лабораторні дослідження, розроблені практичні рекомендації.

7. При знайомстві з дисертацією і авторефератом виник ряд зауважень:

1. В розділі 1 відсутня порівняльна інформація про динамічні параметри МСЕ ДСП, а наведені тільки частотні характеристики, що ускладнює їх аналіз.

2. Механічні характеристики матеріалів графітованих електродів (табл.1.2 -1,3) наведені з різних джерел та мають великий розкид значень. З тексту незрозуміло, які характеристики автор приймає за вихідні.

3. Під час аналізу задач і їхнього рішення автор посилається на джерела, однак у ряді випадків не приводить чітке розмежування між відомими рішеннями і новими результатами власних досліджень (§§ 2.2; 2.3; 2.4; 3.3; 3.4).

4. Зроблені автором висновки (стор. 72) про вплив на власну частоту згинальних коливань консольного електрода умов защемлення електрода в голівці

електродотримача з урахуванням конструкції та геометричних розмірів з'єднання, зусилля затиснення електроду, зміни ваги електроду, температурного фактору цілком справедливі, але не зрозуміло чому в подальших розрахунках автор приймає схему з жорстким заземленням консольного електроду.

5. Динамічні моделі електродотримачів (рис.3.2) складені у припущенні жорсткого з'єднання рукава електродотримача з електродом та урахуванні системи «рукав - електрод» як твердих тіл, що не дає можливість розрахунку деформації консольного електроду як пружного тіла з розподіленою масою, а для практики інтерес представляє розрахунок амплітуд коливань кінця електроду по відношенню до голівки електродотримача.

6. Представляється некоректним використання терміна «вібрація електроду» та «коливання електроду», у той час як автор досліджує власне коливання голівки електродотримача у горизонтальній площині.

7. Результати моделювання коливань системи БЕ при амплітудній модуляції струмів (п.3.8.5), здійснювалось при збудженні з власною частотою коливальної системи, що умовно відповідає автоколиванням у системі при проплавленні колодязів. Це на думку автора, дозволяє порівняти амплітуди коливань в досліджуваних системах електродотримачів при резонансних режимах та підтвердити зменшення амплітуд коливань голівки БЕ, однак автоколивання у системах електродотримачів мають свої особливості і вимагають уточнення математичних моделей, характеристик збудження та подальшого імітаційного дослідження.

8. У розділі 4 наведені результати лабораторних досліджень коливань на фізичній моделі підсистеми БЕ з демпфером позиційного сухого тертя, однак в роботі відсутні порівняння даних натурних вимірювань з результатами аналітичних досліджень на підставі наведеної математичної моделі підсистеми (п.4.2.1).

Зазначені зауваження не є принциповими і не знижують загальну позитивну оцінку роботи та можуть бути враховані в подальшій роботі.

8. Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам

У цілому дисертаційна робота А.О. Власова на тему «Вдосконалення механічної системи електродотримачів дугової сталеплавильної печі для зменшення вібрацій електродів» є завершеною науково-дослідною роботою, у якій отримані нові науково обґрунтовані теоретичні й експериментальні результати, що у сукупності вирішують науково-технічну задачу зменшення вібрацій електродів за рахунок вдосконалення механічної системи електродотримачів дугової сталеплавильної печі шляхом застосування нової конструкції балансирного електродотримача з шарнірним кріпленням рукава до рухомої стійки та обґрунтування раціональних геометричних і динамічних параметрів системи на підставі встановлених закономірностей коливань електроду в горизонтальній площині в системі балансирного електродотримача при дії нестационарного електродинамічного збудження, що є істотним для розвитку теорії, практики конструювання й експлуатації металургійних машин.

Дисертація оформлена відповідно вимогам стандартів і вимог ДАК МОН України, викладена технічно грамотною мовою і зауважень не викликає. Автореферат дисертації (об'ємом 22 стор.) в цілому відображає зміст дисертації, отримані наукові результати і висновки.

Тема, зміст і основні положення дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.05.08 - Машини для металургійного виробництва.

Обґрунтованість і вірогідність теоретичних і практичних методів рішення поставлених завдань, наукова новизна і практична цінність результатів дають підстави для висновку, що дисертаційна робота А.О. Власова відповідає вимогам ДАК МОН України, що пред'являються до кандидатських дисертацій (п. 9, 11, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р.), а її автор **Власов Андрій Олександрович** заслуговує присвоєння йому наукового ступеня кандидата технічних наук.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
відділу технологічного обладнання та систем управління
Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова
Національної академії наук України,
Заслужений працівник промисловості України

В.В. Вереньов

Підпис Вереньова В.В. засвідчую.

Вчений секретар
Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова
Національної академії наук України,
кандидат технічних наук



О.Є. Меркулов