

Усі примірники
дисертації ідентичні
за змістом
Голова спеціалізованої
вченої ради ДФ 08.084.002
Ахундов В.М.

Міністерство освіти і науки України
Національна металургійна академія України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Баглай Андрій Васильович

УДК 621.771.06

ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОКАТНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАЦІОНАРНОЇ СИСТЕМИ ВІБРАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ

133 – «Галузеве машинобудування»

13 – «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 А.В. Баглай

Науковий керівник:

Білодіденко Сергій Валентинович
доктор технічних наук, професор.

Дніпро – 2021

АНОТАЦІЯ

Баглай А.В. Розвиток наукових основ визначення технічного стану прокатного обладнання за допомогою стаціонарної системи вібраційного моніторингу – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування (Галузь знань 13 – Механічна інженерія). – Національна металургійна академія України Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена питанням обґрунтування та розробки способів, методів, принципів і систем вібраційного моніторингу та діагностування технічного стану (ТС) обладнання клітей безперервного широкоштабового стана (БШШС) гарячої прокатки, а також перевірки їх працездатності та ефективності у виробничих умовах.

У дисертаційній роботі отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що у сукупності є суттєвими для рішення актуальної науково-технічної задачі підвищення надійності обладнання клітей БШШС гарячої прокатки завдяки розробці способів, методів, принципів і систем вібраційного моніторингу та діагностування ТС контрольованого обладнання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше для корпусного обладнання лінії приводу кожної кліті багатоклітьового безперервного стана шляхом вимірювань отримані дані про вібраційне поле у вигляді реалізації віброшвидкості в 7-9 точках під час робочого і холостого режиму, гістограм і середньоквадратичного відхилення;
- вперше на базі великої кількості вимірювань для всіх клітей встановлений статистичний зв'язок відносного часу запізнювання реакції ділянок лінії приводу від часу напруцювання шпинделів (зносу бронзових вкладишів) з урахуванням прокатаного сортаменту. Визначено граничні кількісні значення часу запізнювання, при досягненні яких рекомендується проведення технічного обслуговування;

- вперше обґрунтована та розроблена концепція визначення технічного стану обладнання за допомогою діагностичних ознак, які отримують для двох режимів роботи стана: а) захоплення смуги валками і б) сталий режим роботи;
- встановлено, що максимальне значення розмаху віброшвидкості корпусного обладнання редуктора і шестеренної кліті під час захоплення смуги валками статистично пов'язано з технічним станом (зносом бронзових вкладишів) шпиндельного зчленування і є діагностичною ознакою. Вперше встановлена кореляційна залежність максимального розмаху віброшвидкості при захопленні смуги валками від статичного моменту прокатки на валу двигуна;
- вперше встановлена залежність часу поширення ударного імпульсу через смугу що прокочується до попередньої кліті з урахуванням температури металу і міжклітьової відстані. Це дозволяє використовувати дану залежність для оцінки стану технології і обладнання.

Практичне значення розробленої методики полягає в можливості вибору періодів цілеспрямованих вібраційних вимірювань, коли в найбільшій мірі проявляється зв'язок діагностичних ознак зі станом обладнання, що сприяє підвищенню ефективності та достовірності процесу діагностування.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану розробки систем вібраційного діагностування обладнання прокатних станів, систематизовані конструктивні і технологічні особливості БШШС, аналізуються поломки і відмови елементів обладнання, розглядається проблематика розробки способів і систем діагностування прокатних станів.

Показано, що в Україні технічне діагностування металургійного устаткування отримало розвиток з 80-х років минулого сторіччя як засіб підвищення надійності. За цей час в цьому напрямку утворилися три наукові школи. В першій школі з Донецької Політехніки (В.Я. Седуш, М.О. Ченцов, В.А. Сидоров) розробляються методи діагностування переносними засобами вібраційного аналізу з контролем його параметрів. В другій школі Національній Металургійної Академії України (А.В. Гордієнко, В.К. Цапко, С.В. Білодіденко) розроблено теоретичні основи обслуговування і діагностування технологічного устаткування за контро-

лем комплексних показників надійності, ризику і безпеки. Третя школа, яка сформувалася у м. Дніпро в ІЧМ НАНУ (В.І. Большаков, В.В. Вереньов), культивує використання перехідних процесів у якості діагностичних показників технічного стану прокатного обладнання.

У роботах іноземних авторів (Пекельс Ж., Міттен К., Гайгемюллер Г., Шварц М., Аренс М., Мекель Дж., Хелекаль Г. та ін.) наведено приклади застосування систем діагностики прокатних станів і їх економічної ефективності. Зроблено висновки про актуальність створення і обґрунтування методів і способів діагностування та відповідних систем, спрямованих на підвищення ефективності роботи прокатних станів.

У другому розділі приведено аналіз вібродинамічних процесів в прокатних станах, представлених в літературних джерелах. Вперше виділені парціальні динамічні системи і точки вимірів в механічному обладнанні лінії головного приводу і власне прокатної кліті, в яких встановлено взаємозв'язок динамічних процесів, що мають відношення до способів діагностування.

Визначені точки і місця обладнання, яким найбільшою мірою властива інформативність та зв'язок з ТС і зносом зчленувань.

Розглянуто фактори що провокують та впливають на вібродинамічні процеси під час захоплення смути валками та в сталому режимі прокатки (спільно з холостим ходом).

Визначені закономірності періодичності зносу та утворення зазорів на шпиндельній і моторній ділянках та їх зв'язку з тривалим часом роботи стану і заміною елементів.

Обґрунтовано та запропоновано метод визначення цілеспрямованих періодів вібраційних вимірювань, під час яких досягається найбільший ефект в діагностуванні ТС обладнання. Він дозволяє отримати значення «найкращих» діагностичних параметрів при нормальному стані обладнання та «найгірших» після тривалої роботи клітей або перед капітальним ремонтом. Знання «крайніх» значень параметрів та їх порівняльний аналіз з поточними значеннями сприяє підвищенню достовірності встановлення діагнозу.

БШШС гарячої прокатки відноситься до довгих (до 1000 м) просторових об'єктів і складається з 10 - 12 машин. У зв'язку з цим розроблені загальна концепція та принципи побудови вібродіагностичної системи моніторингу ТС обладнання. Вирішені питання вимірювальних засобів, кількості каналів і ліній передачі сигналів до єдиного реєстратора, зв'язку з штатними системами вимірювання та регулювання.

Розроблено технічні вимоги до системи вібраційного моніторингу та діагностування ТС обладнання клітей БШШС гарячої прокатки.

У третьому розділі наведено аналіз виконаних на стані 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» цілеспрямованих дослідно-промислових вібровимірювань, представлена методика та засоби вимірювань.

Для кожної з десяти клітей визначені візуальні образи вібраційних процесів одночасно у всіх точках обладнання при нормальному (після ремонту або встановлення нового шпинделя) і погіршеному (перед ремонтом) стані. Тим самим вперше отримані образи вібраційного поля клітей в холостому режимі, при захопленні смуги валками і в процесі прокатки.

У всіх клітях підтверджено раніше встановлену властивість запізнювання реакції ділянок лінії приводу на дію ударного навантаження до робочої кліті. Чим далі від кліті розташована точка (датчик вібрації), тим більше час запізнювання τ_3 . Вперше встановлено, що час запізнювання τ_3 не залежить від швидкості прокатки, а тільки від стану зносу в зчленуваннях. Для кожної i -тої точки клітей визначені граничні значення τ_{3i} , при досягненні яких слід здійснювати заміну шпинделів.

У парі клітей ДУО - № 1 під час безперервної прокатки встановлено, що залежність амплітуди вібрації власне кліті ДУО та шестеренної кліті від швидкості неузгодженості задання сляба в кліті № 1 має мінімум. На цій підставі запропоновано спосіб корекції швидкості завдання сляба.

Незважаючи на велику відстань між клітями № 2 - № 3 (19 м) і № 3 - № 4 (25 м) в даних парах клітей також встановлено взаємодію обладнання по вібрації під час безперервної прокатки, коли відбувається захоплення смуги в наступній кліті.

Вперше за даними вимірів визначена швидкість поширення енергії (крутильного ударного навантаження) уздовж лінії приводу і між клітьями через розпечену смугу, що прокочується.

Встановлено, що швидкість поширення ударного навантаження від робочої кліті до i -тої точки вимірювання як і час τ_i залежить від зазору $\delta_{\text{ш}}$ в шпіндельному зчленуванні. У той же час між точками «всередині» лінії вона від зазору $\delta_{\text{ш}}$ не залежить, а визначається конструктивною особливістю і технічним станом ділянки. Наприклад, це передача навантаження через зубчасте зчеплення колеса і шестерні редуктора або валу з зубчастими муфтами.

Встановлено, що розмах віброшвидкості в момент захоплення смуги валками через жорсткість осередку деформації залежить від марки сталі і режиму обтиснень. Чим жорсткіше осередок, тим більше розмах віброшвидкості, тим більше сила удару в кліті (за інших рівних умов). При прокатці товстих смуг (4 - 6 мм) розмах віброшвидкості виявився в 1,3...1,6 рази менше, ніж при прокатці тонких смуг (2 - 2,5 мм). Жорсткість осередка збільшується до останніх клітей чистової групи, разом з цим зростає розмах вібрації.

Вперше встановлена кореляційна залежність розмаху вібрації A_p при захопленні смуги від статичного моменту $M_{\text{ст}}$. Зі збільшенням статичного моменту $M_{\text{ст}}$ розмах вібрації A_{max} зростає. Чим більший знос бронзових вкладишів шпінделів та кутових зазорів $\delta_{\text{ш}}$, тим більше A_{max} . Надано обґрунтування зазначеним залежностям. Представлені графічні зображення кореляційних полів $\{A_{\text{max}}, M_{\text{ст}}\}$ при нормальному та погіршеному технічному стані устаткування. Визначено кількісні характеристики, за якими можна оцінювати поля, порівнювати їх між собою та з технічним станом (коефіцієнт кореляції r , апроксимуюча залежність $A_{\text{max}}(M_{\text{ст}})$).

У четвертому розділі виконані дослідження впровадженої на стані 1680 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» системи діагностування. Надано аналіз способів визначення ТС обладнання прокатних клітей за результатами вібровимірювань. Уза-

гальнені та розглянуті інформативні і діагностичні ознаки та їх зв'язок з параметрами технічного стану редуктора.

Розглянуто питання використання параметрів вібраційних процесів в суміжних клітках в перехідних процесах захоплення та викиду смуги валками.

Розроблено ряд нових способів діагностування та вдосконалені відомі способи і методи визначення та розпізнавання технічного стану вузлів.

У п'ятому розділі представлені структура і технічні характеристики системи, методи обробки та візуалізації результатів вимірювань, описані принципи обробки, формування та зберігання бази даних вимірювань.

Надано опис методики моніторингу вібраційних процесів одночасно у всіх клітках багатоклітьового стану.

Наведено практичні приклади діагностування деградації вузлів і попередження поломок. Надана оцінка ефективності роботи системи в цеху гарячої прокатки тонкого листа технічним керівництвом ПрАТ «Запоріжсталь» (відгук про роботу стаціонарної системи на прокатному стані 1680 в ЦГПТЛ від 03.06.2019р).

Ключові слова: безперервний широкоштабовий стан, гаряча прокатка, кліть, лінія головного приводу, динаміка, вібраційні процеси, моніторинг, технічний стан, час запізнення, діагностика.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА (LIST OF PUBLICATION)

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Публікації в періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу у виданнях:

1. **A. Baglay.** Fatigue Resistance Models of Structural for Risk Based Inspection / S. Belodedenko, V. Hanush and other. *Civil Engineering Journal*. 2020. Vol. 6. Issue 2. P. 375–383. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2020-03091477> (Web of Science, Scopus).

2. **Baglay A.V.** Vibrodiagnostics system for rolling mill equipment / A.V.Baglay M.M. Kipin and other. *Chernye Metally*. 2020 Vol. 2. P. 62–69 (Scopus).

Публікації в наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, затверджених МОН України:

3. **Баглай А.В.** Вибрационное обследование стана 1150. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2017. № 1. С 54–57. <https://doi.org/10.15407/tdnk2017.01.09>

4. **Баглай А.В.,** Веренев В.В. Сравнительный диагностический анализ вибропереходных процессов в смежных прокатных клетях. *Системні технології*. 2018. Вип. 4. №117. С. 3–9.

5. Веренев В.В., **Баглай А.В.,** Белодеденко С.В. Вопросы вибрационного диагностирования оборудования прокатных станов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2018. № 2. С. 59–62. <https://doi.org/10.15407/tdnk2018.02.08>

6. Веренев В.В., **Баглай А.В.,** Белодеденко С.В. Особенности вибрационных измерений в прокатных клетях. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2018. № 3. С. 43–46. <https://doi.org/10.15407/tdnk2018.03.05>

7. Веренев В.В., **Баглай А.В.,** Кипин М.М. Динамика парциальных упругих систем прокатных клетей. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2018. № 7. С. 104–107.

8. **Баглай А.В.,** Кипин М.М., Дубина М.А. Вибрационная диагностика редуктора широкополосного прокатного стана 1680. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2019. № 1. С 53–57. <https://doi.org/10.15407/tdnk2019.01.07>

9. **Баглай А.В.** Комплекс автоматической вибрационной диагностики оборудования прокатного стана / А.В.Баглай, А.Н.Гузеев и др. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2019. № 3. С 30–35. <https://doi.org/10.15407/tdnk2019.03.05>

10. **Баглай А.В.,** Вереньов В.В. Динаміка та діагностика зазорів в клітях з багатонитковою прокаткою. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2020. № 3. С 58–60. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.03.09>

11. **Баглай А.В.** Використання особливостей технології та режимів роботи прокатних клітей з діагностичною метою. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2020. № 4. С 50–52. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.04.08>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. **Баглай А.В.** Диагностическая информативность вибраций корпусного оборудования линии привода прокатной клетки. *Приладобудування: стан і перспективи*: зб. матеріалів доп. учасн. XVI Міжнар. наук.-техніч. конф. Київ: НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, 2017. С. 109–110.

13. Білодіденко С.В., **Баглай А.В.**, Гречаний О.М. Пошук функцій розподілу довговічностей для параметричних моделей. *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences: Book of Abstracts International research and practice conference*. Radom, Republic of Poland: Radom Academy of Economics, 2017. P. 102–106

14. S. Belodedenko, G. Bilichenko, **A. Baglay**, A. Grechany Fatigue resistance models of structural for RBI-maintenance. *Proceedings of the 19th International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals: Book of Abstracts*. Porto: Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia, 2018. P. 77–78.

15. **Баглай А.В.** Стационарні системи моніторингу технічного стану промислового обладнання металургійного виробництва. *Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики*: зб. матеріалів доп. учасн. XXII Міжнар. конф. Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2018. С. 30

16. Веренев В.В., **Баглай А.В.** Обратные удары в клетях прокатных станов. *Машины і пластична деформація металу*: зб. матеріалів доп. учасн. IV Міжнар. наук.-техніч. конф. Кам'янське: ДДТУ, 2018. С. 48

17. **Баглай А.В.**, Веренев В.В. Сравнительный диагностический анализ вибропереходных процессов в смежных прокатных клетях. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ-2018*: зб. матеріалів доп. учасн. X Міжнар. наук.-практич. конф. Дніпро: НМетАУ, 2018. С. 5.

18. Баглай А.В. Развитие системы диагностики широкополосного стана. *Університетська наука – 2019*. зб. матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-техніч. конф.

Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. С. 69–71.

19. **Баглай А.В.**, Кипин М.М. Системный подход к обеспечению надежности работы многоклетевых станов. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ-2020*: зб. матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-практич. конф. ім. проф. Михальова О.І. Дніпро: НМетАУ, 2020. С. 8–12.

20. **Баглай А.В.** Использование особенностей технологии и режимов работы прокатных клетей в диагностических целях. *Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану*: зб. матеріалів доп. учасн. XXIII Міжнар. конф. Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2020. С. 5.

21. **Баглай А.В.**, Веренев В.В. Динамика и диагностика зазоров в клетях с многониточной прокаткой. *Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану*: зб. матеріалів доп. учасн. XXIII Міжнар. конф. Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2020. С. 6.

22. **Баглай А.В.** Зв'язок вібраційних процесів в устаткуванні з технологією гарячої прокатки. *Машини та технології обробки металів тиском*: зб. матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-техніч. конф. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 37–40.

23. **Баглай А.В.** Визначення технічного стану обладнання лінії приводу прокатних валків по швидкості розповсюдження ударного імпульсу. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ-2021*: зб. матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-практич. конф. Дніпро: НМетАУ, 2021. С. 21–24.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

24. **Баглай А.В.**, Білодіденко С.В. Передові технології контролю якості виготовлення і ремонту для підприємств залізничного машинобудування. *Вісник сертифікації залізничного транспорту*. 2017. № 6. С. 18–23.

25. **Баглай А.В.**, Кіпін М.М., Дубіна М.О. Впровадження автоматичної системи контролю та діагностики технічного стану вентиляторів газоочищення мартеновських печей. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2020. № 3. С. 48–52. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.03.07>

ANNOTATION

A.V. Baglai. Development of scientific bases for determining the technical condition of rolling equipment using a stationary vibration monitoring system. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in Mechanical engineering sciences, speciality 133 – Industry engineering. – National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2021.

The dissertation is devoted to the issues of substantiation and development of methods, methods, principles and systems of vibration monitoring and diagnostics of the technical condition (TC) of the equipment of the stands of a continuous broadband hot rolling mill, as well as checking their operability and efficiency in production conditions.

In the dissertation work new scientifically substantiated theoretical and experimental results are obtained, which together are essential for solving the current scientific and technical problem of increasing the reliability of hot rolling mill equipment by developing methods, methods, principles and systems of vibration monitoring and diagnosing controlled vehicles. equipment.

Scientific novelty of the obtained results:

- for the first time for the case equipment of the drive line of each cage of the multicellular continuous state by measuring the data on the vibration field in the form of vibration velocity realization at 7-9 points during operating and idle mode, histograms and standard deviation;
- for the first time on the basis of a large number of measurements for all stands established a statistical relationship of the relative delay time of the reaction of the drive line sections from the time of operation of the spindles (wear of bronze inserts) taking into account the rolled range. The maximum quantitative values of the delay time are determined, at the achievement of which it is recommended to carry out maintenance;
- for the first time the concept of determination of a technical condition of the

equipment by means of diagnostic signs which receive for two modes of work of a condition is proved and developed: a) capture of a strip by rolls and b) a steady mode of work;

- it is established that the maximum value of the vibration velocity of the gear equipment of the gearbox and the gear stand during the capture of the strip by rollers is statistically related to the technical condition (wear of bronze liners) of the spindle joint and is a diagnostic feature. For the first time the correlation dependence of the maximum scope of vibration speed at capture of a strip by rolls on the static moment of rolling on a motor shaft is established;
- for the first time the dependence of the time of propagation of the shock pulse through the strip that is rolled to the previous cage, taking into account the temperature of the metal and the intercellular distance. This allows you to use this dependence to assess the state of technology and equipment.

The practical significance of the developed technique lies in the possibility of choosing the periods of purposeful vibration measurements, when the connection of diagnostic features with the condition of the equipment is most manifested, which increases the efficiency and reliability of the diagnostic process.

The first section analyzes the current state of development of vibration diagnostics systems for rolling mill equipment, systematizes the design and technological features of broadband mills, analyzes breakdowns and failures of equipment elements, considers the development of methods and systems for diagnosing rolling mills.

It is shown that in Ukraine technical diagnostics of metallurgical equipment has been developed since the 80s of the last century as a means of increasing reliability. During this time, three scientific schools were formed in this direction. In the first school of Donetsk Polytechnic (V.Y. Sedush, M.O. Chentsov, V.A. Sidorov) methods of diagnosing by means of portable means of vibration analysis with control of its parameters are developed. In the second school of the National Metallurgical Academy of Ukraine (A.V. Gordienko, V.K. Tsapko, S.V. Belodedenko) the theoretical bases of service and diagnostics of the technological equipment under control of complex indicators of reliability, risk and safety are developed. The third school, which was

formed in Dnipro at the Iron and Steel Institute of NAS of Ukraine (V.I. Bolshakov, V.V. Verenev), cultivates the use of transients as diagnostic indicators of the technical condition of rolling equipment.

In the works of foreign authors (Pekels J., Mitten K., Geigemüller G., Schwartz M., Arens M., Mekel J., Helekal G., etc.) give examples of the application of diagnostic systems for rolling mills and their economic efficiency. The conclusion is made about the relevance of the creation and substantiation of methods and methods of diagnostics and corresponding systems aimed at improving the efficiency of rolling mills.

The second section provides an analysis of vibrodynamic processes in rolling mills, presented in the literature. For the first time, partial dynamic systems and measurement points in the mechanical equipment of the main drive line and the rolling stand itself are identified, in which the relationship of dynamic processes related to diagnostic methods is established.

The points and places of the equipment, which are most inherently informative and related to the technical condition and wear of the joints, have been determined.

The disturbing factors influencing vibrodynamic processes in the modes of strip gripping by rolls and steady rolling (together with idling) are considered.

The regularities of the periodicity of wear and gap formation on the spindle and motor sections are determined in connection with the operating time of the mill and the replacement of elements.

A method for determining purposeful periods of vibration measurements, during which the greatest effect in diagnosing equipment TC is achieved, is substantiated and proposed. It allows one to obtain the values of the "best" diagnostic parameters in the normal state of the equipment and the "worst" ones after long-term operation of the stands or before major repairs. Knowledge of the "extreme" values of the parameters and their comparative analysis with the current ones helps to increase the reliability of the diagnosis.

Continuous broadband hot rolling mill refers to an extended (up to 1000 m) spatial object, consisting of 10-12 machines. In this regard, a general concept and principles for constructing a vibration diagnostic system and monitoring the technical condition of

equipment have been developed. Issues of measuring instruments, the number of channels and signal transmission lines to a single recorder, communication with standard measurement and regulation systems have been resolved.

Technical requirements to the system of vibration monitoring and diagnostics of technical condition of equipment of stands of continuous large-scale state of hot rolling are developed.

In the third section, the analysis of the purposeful experimental-industrial vibration measurements performed at the mill 1680 is presented, the methodology and measuring instruments are presented.

For each of the ten stands, visual images of vibration processes were determined simultaneously at all points of the equipment in normal (after repair or installation of a new spindle) and deteriorated (before repair) condition. Thus, for the first time, the images vibration field of stands in idle mode, when the strip is gripped by rolls and during rolling.

In all stands, the previously established property of delaying the response of the drive line sections to the application of a shock load to the working stand was confirmed. The further from the stand is the point (vibration sensor), the longer the delay time τ_3 . It was established for the first time that the time τ_3 does not depend on the rolling speed, but only on the state of wear in the joints. For each i -th point of the stands, the limiting values τ_{3i} , are determined, upon reaching which it is necessary to replace the spindles.

In a pair of stands, DUO - № 1 is installed during continuous rolling. that the dependence of the vibration amplitude of the duo stand and the gear stand on the speed of the mismatch of the slab problem in stand № 1 has a minimum. On this basis, a patent-protected method for correcting the slab setting speed is proposed.

Despite the large distance between stands № 2 – № 3 (19 m) and № 3 – № 4 (25 m), in these pairs of stands, the interaction of equipment for vibration during continuous rolling was also established, when the strip is captured in the next stand. For the first time, according to the measurement data, the velocity of energy propagation (torsional shock load) along the drive line and between the stands through the hot rolled strip was

determined.

It has been established that the speed of propagation of the shock load from the working stand to the i -th measurement point, as well as the time τ_i , depends on the clearance δ_{III} in the spindle joint. At the same time, between the points «inside» the line, it does not depend on the gap δ_{III} , but is determined by the design feature and technical condition of the section. For example, this is the transmission of a load through the gearing of a wheel and pinion of a reducer or a shaft with gear couplings.

It has been established that the range of vibration velocity at the moment when the strip is captured by the rolls through the rigidity of the deformation zone depends on the steel grade and the compression mode. The stiffer the focus, the greater the range of vibration velocity, the greater the impact force in the cage (all other things being equal). When rolling thick strips (4–6 mm), the vibration velocity swing was 1,3...1,6 times less than when rolling thin strips (2–2,5 mm). The rigidity of the hearth increases towards the last stands of the finishing group, along with this, the vibration range increases.

For the first time, the correlation dependence of the vibration amplitude A_p during the capture of the strip on the static moment M_{CT} was established. With an increase in the static moment M_{CT} , the amplitude of vibration A_{max} increases. The more the wear of the bronze spindle liners and the angular clearances δ_{III} , the more A_{max} . The substantiation of the noted dependencies is given. The graphical images of the correlation fields $\{A_{max}, M_{CT}\}$ under normal and deteriorated technical condition of the equipment are presented. Quantitative characteristics were determined by which the fields can be estimated, compared with each other and with TS (correlation coefficient r , approximating the dependence $A_{max}(M_{CT})$).

In the fourth section, studies of the diagnostics system introduced at the 1680 mill are carried out. The analysis of methods for determining the technical condition of the equipment of rolling stands based on the results of vibration measurements. The informative and diagnostic signs and their relationship with the parameters of the gearbox vehicle are generalized and considered. For the first time for a rolling mill,

calculations were performed and the interrelationships of processes at a number of points of equipment were investigated using cross-correlation functions. The features of the signal delay and their propagation are established. Data on the speed of signal propagation were obtained.

The issues of using the parameters of vibration processes in adjacent stands in transient processes of strip capture and ejection by rolls are considered.

A number of new diagnostic methods have been developed and the known methods and methods for determining and recognizing TS nodes have been improved.

The fifth section presents the structure and technical characteristics of the system, methods of processing and visualization of measurement results, describes the principles of processing, formation and storage of the measurement database.

A description of the methodology for monitoring vibration processes simultaneously in all stands of a multi-stand mill is given.

Practical examples of diagnosing the degradation of units and preventing breakdowns are given. An assessment of the efficiency of the system in the shop of hot rolling of thin sheet by the technical management of PJSC «Zaporizhstal» (review of the operation of the stationary system on the rolling mill 1680 in shop of hot rolling of a thin sheet from 03.06.2019).

Key words: continuous broadband mill, hot rolling, stand, main drive line, dynamics, vibration processes, monitoring, technical condition, diagnostics.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	26
1.1 Конструктивні та технологічні особливості безперервних широкоштабових станів.....	26
1.2 Аналіз поломок і відмов обладнання.....	29
1.3 Проблематика розробки систем моніторингу і діагностики для прокатних станів.....	32
1.4 Аналіз систем вібраційної діагностики механічного обладнання прокатних станів.....	35
1.5 Висновки.....	40
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ І РОЗРОБКА НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ ТА ВИМОГ ДО СИСТЕМИ ВІБРАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ СТОСОВНО ДО БЕЗПЕРЕРВНОГО ШИРОКОШТАБОВОГО СТАНУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ.....	41
2.1 Аналіз літературних даних по вимірах вібродинамічних процесів.....	41
2.2 Обґрунтування вибору найбільш інформативних точок обладнання та періодів вимірювань.....	57
2.3 Загальні принципи побудови вібродіагностичної системи багатоклітьового стану.....	67
2.4 Висновки.....	68
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВІ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ, ЇХ ОБРОБКА, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ.....	70
3.1 Методика і засоби проведення вимірювань.....	70
3.2 Аналіз результатів вимірювань.....	76
3.2.1 Чорнова група клітей.....	76
3.2.2 Чистова безперервна група клітей.....	80
3.3 Зв'язок вібраційних процесів з технологією прокатки, навантаженнями і технічним станом.....	84

	18
3.4 Аналіз діагностичної інформативності вимірюваних параметрів.....	95
3.5 Деякі питання з діагностики.....	103
3.6 Висновки.....	108
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДІВ І СПОСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ	
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЛІНІЙ ГОЛОВНОГО ПРИВОДУ ВАЛКІВ.....	109
4.1 Аналіз відомих способів визначення технічного стану	
прокатних клітей.....	109
4.2 Логістичний підхід до діагностування за часом запізнювання.....	110
4.3 Діагностування по швидкості розповсюдження	
ударної хвилі (імпульсу).....	117
4.4 Визначення технічного стану лінії приводу в клітях	
з багатонитковою прокаткою.....	118
4.5 Діагностування при викиді хвостової ділянки смуги з валків.....	124
4.6 Діагностування шляхом пригальмовування швидкості	
обертання валків.....	128
4.7 Діагностування шляхом зміни швидкості валків.....	131
4.8 Допустимі значення часу запізнювання ділянок лінії приводу.....	138
4.9 Висновки.....	140
РОЗДІЛ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ	
СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ НА СТАНІ 1680.....	141
5.1 Структура і технічні характеристики системи.....	141
5.1.1 Загальна характеристика об'єкта контролю.....	142
5.1.2 Технічний опис СКТС «Корунд».....	144
5.1.3 Склад СКТС «Корунд» стану 1680.....	151
5.1.4 Надійність СКТС.....	153
5.2 Обробка і представлення результатів вимірювань.	
Принципи формування бази даних вимірювань та обробки.....	154
5.3 Розробка методики моніторингу вібраційних процесів	
обладнання всіх клітей безперервного стану.....	166
5.4 Практичні приклади діагностування вузлів агрегатів.....	167

	19
5.5 Гранично допустимі рівні вібрацій.....	175
5.6 Ефективність застосування системи на стані 1680.....	187
5.7 Висновки.....	198
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	199
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	202
ДОДАТОК А.....	214
ДОДАТОК Б	215

ВСТУП

Актуальність роботи. БШШС гарячої прокатки виготовляються за індивідуальними проектами в одиничних екземплярах. До їх складу входять 10 - 12 прокатних клітей і масивні агрегати великої одиничної потужності, шестеренні кліті і редуктори, що відрізняються по всім клітям розмірним рядом. Істотно змінюється швидкість прокатки від першої (1 м/с) чорнової до останньої (10...17 м/с) чистової кліті. Продукція БШШС гарячої прокатки завжди забезпечувала металургійні комбінати (МК) високою економічною ефективністю. Вихід з ладу через поломки однієї з клітей призводить до великих втрат виробництва, позапланового технічного обслуговування і витрат на ремонт. Тільки в чорнових клітях стану 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» (5 клітей) фіксувалося від 9 до 21 поломки на рік, в тому числі й редукторів. Цьому багато в чому сприяє ударний характер дії навантаження під час захоплення смуги валками і формування при цьому суттєвих динамічних навантажень та вібродинамічних процесів в механічному обладнанні. На БШШС гарячої прокатки також постійно впроваджується прокатка смуг нових економічно вигідних сорторозмірів, зокрема товщиною 1,0...1,5 мм, що пов'язано зі збільшенням статичних та ударних навантажень і посиленням динамічних навантажень.

Обслуговування обладнання прокатних станів на основі знань про його фактичний стан відноситься до сучасних прогресивних методів і знаходить все більше поширення. Найбільш повну інформацію про стан механічних вузлів забезпечують системи поточного моніторингу вібрації і діагностування обладнання.

У зв'язку з цим дослідження по вібродинамічним процесам в різних вузлах устаткування прокатних станів з урахуванням технічного стану та різноманітності режимів роботи і технологічного процесу, розробка і обґрунтування методів і способів діагностування включно до впровадження систем діагностики є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи пов'язана з напрямком наукової діяльності кафедри «Машини і

агрегати металургійного виробництва» Національної металургійної академії України – «Технічне обслуговування та діагностування механічних систем за контролем їх безпеки та ризику».

Дисертація є складовою частиною науково-дослідної роботи «Дослідження правил об'єднування показників надійності елементів силових систем стосовно стратегії обслуговування промислового обладнання за фактичним технічним станом» (Державна реєстрація № 0119U100885) при участі здобувача як виконавця.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертації є розвиток наукових основ визначення технічного стану прокатного обладнання БШШС гарячої прокатки за допомогою стаціонарної системи вібраційного моніторингу та діагностики; розробка і вдосконалення способів діагностування та методів розпізнавання технічного стану, спрямованих на запобігання раптових відмов обладнання та підвищення ефективності роботи станів.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлені наступні завдання:

1. Виконати аналіз існуючих систем технічної діагностики прокатних станів і наявних даних вимірів вібродинамічних процесів в клітках БШШС гарячої прокатки, їх систематизація і особливості.
2. Обґрунтувати точки (місця, ділянки) вимірювань і контролю, їх кількість, розташування датчиків вібрації в клітках стану.
3. Виконати дослідно-промислові вимірювання в чорновій і чистовій групах клітей з урахуванням особливостей технології, включаючи безперервну прокатку.
4. Визначити особливості вібропроцесів і часу запізнювання реакції вібродатчиків при захопленні смуги валками залежно від часу напрацювання шпинделів (зносу бронзових вкладишів) і зачеплень редуктора.
5. Визначити особливості формування вібропроцесів і часу запізнювання при взаємодії суміжних чорнових клітей через товсту смугу що прокочується.
6. Визначити фактичні спектри частот вібрації і порівняти з розрахунковими частотами зубчастих зачеплень і підшипників під час холостого і робочого режиму роботи при різному ТС обладнання.
7. Встановити зв'язок особливостей вібрації зі станом і напрацюванням вузлів

лінії головного приводу валків на основі аналізу даних записів в агрегатних журналах.

8. Обґрунтувати і розробити нові способи діагностування, сформулювати правила розпізнавання стану обладнання лінії приводу в цілому і її вузлів.

9. Розробити загальну концепцію системи вібраційного моніторингу та діагностики для БШШС гарячої прокатки (архітектура, частота і тривалість вимірювань, обробка, візуалізація та зберігання інформації, формування баз даних, зв'язок з цеховими базами даних і з системами регулювання та ін.).

Об'єкт дослідження: вібродинамічні процеси в різних вузлах устаткування під час захоплення смуги валками та усталеного режиму прокатки.

Предмет дослідження: параметри ТС, вібрації, конструкції і режими роботи клітей стану та їх вплив на вібродинамічні процеси і роботу устаткування.

Методи дослідження. В роботі використані принципи системного аналізу взаємозв'язків параметрів ТС обладнання та вібродинамічних процесів протягом тривалої експлуатації багатоклітьового БШШС гарячої прокатки з урахуванням режимів роботи і технічного обслуговування. Застосовані ймовірностно-статистичні методи обробки результатів вимірювань, методи спектрального аналізу випадкових процесів. Досліди і промислові вимірювання виконані за допомогою сертифікованої вимірювальної і реєструючої апаратури.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше для корпусного обладнання лінії приводу кожної кліті багатоклітьового безперервного стану шляхом вимірювань отримані дані про вібраційне поле у вигляді реалізації віброшвидкості в 7-9 точках під час робочого і холостого режиму, гістограм і середньоквадратичного відхилення. Вперше для прокатних станів встановлені особливості зміни розмаху вібрацій в точках вібраційного поля з урахуванням стану обладнання, встановлені граничні значення вібропараметрів.

2. Вперше на базі великої кількості вимірювань для всіх клітей встановлений статистичний зв'язок відносного часу запізнювання реакції ділянок лінії приводу від часу напрацювання шпинделів (зносу бронзових вкладишів)

з урахуванням прокатаного сортаменту. Визначено граничні кількісні значення часу запізнювання, при досягненні яких рекомендується проведення технічного обслуговування.

3. Вперше обґрунтована та розроблена концепція визначення технічного стану обладнання за допомогою діагностичних ознак, які отримують для двох режимів роботи стану: а) захоплення смуги валками і б) сталий режим роботи.

4. Встановлено, що максимальне значення розмаху віброшвидкості корпусного обладнання редуктора і шестеренної кліті під час захоплення смуги валками статистично пов'язано з технічним станом (зносом бронзових вкладишів) шпиндельного зчленування і є діагностичною ознакою. Вперше встановлена кореляційна залежність максимального розмаху віброшвидкості при захопленні смуги валками від статичного моменту прокатки на валу двигуна.

5. Вперше встановлена залежність часу поширення ударного імпульсу через смугу що прокочується до попередньої кліті з урахуванням температури металу і міжклітьової відстані. Це дозволяє використовувати дану залежність для оцінки стану технології і обладнання.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропонована обґрунтована методика вибору періодів цілеспрямованих вібраційних вимірювань, коли в найбільшій мірі проявляється зв'язок діагностичних ознак з технічним станом обладнання, що сприяє підвищенню ефективності та достовірності процесу діагностування.

2. На підставі результатів натурних вимірювань встановлено гранично допустимі рівні вібрацій в різних вузлах прокатних клітей, які сигналізують обслуговуючому персоналу про неприпустимий знос елементів лінії приводу.

3. Впроваджена на прокатному стані 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» перша вітчизняна система вібраційної діагностики з урахуванням особливостей конструкції, режимів роботи і технології забезпечує нормальну роботу стану шляхом моніторингу рівнів вібрації і попередження перед аварійних ситуацій, що дозволило підвищити ефективність роботи стану (відгук про результати впровадження у ви-

робництво від 16.06.2021 р.). Економічний ефект від запобігання простоїв обладнання стану 1680 складає 11 млн. грн. на рік, а загальний економічний ефект від комплексних заходів – близько 25 млн. грн. (відгук о роботі стаціонарної системи на прокатному стані БШШС-1680 ПрАТ «Запоріжсталь» від 03.06.2019 р.).

4. Розроблено ряд способів діагностування, які дозволили визначати поточний стан обладнання (подано заяву № а202003925 на патент України від 30.06.2020 р.).

Достовірність наукових результатів і висновків підтверджується коректністю постановки задач на основі аналізу та узгодженості вихідних даних, застосуванням теоретичних методів з урахуванням загальноприйнятих і обґрунтованих припущень. Обґрунтованість застосовуваних залежностей підтверджується збігом результатів розрахунків часу запізнювання з даними натурних вимірювань на діючому прокатному стані.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є результатом самостійної під керівництвом д.т.н. С.В. Білодіденко і колективної роботи автора, що відображено низкою публікацій результатів досліджень [94]. У дисертації не використані ідеї співавторів публікацій. Всі принципові теоретичні та експериментальні результати, отримані в дисертації, засновані на дослідженнях, виконаних автором самостійно. Автором виконано огляд систем вібродіагностики і сучасних способів вібраційного діагностування [110, 111]; отримано зв'язок між показниками віброактивності і характеристиками опору втомі [29]; обґрунтовано спільне використання діагностичних ознак в перехідних і сталих режимах роботи [82, 83]; запропоновано вимірювати час запізнення реакції ділянок при захваті штаби в кожній наступній клітці і визначити різницю в часі між клітками [95]; запропонована методика вибору найбільш ефективних періодів вимірювань [77, 102, 103]; запропоновано застосувати спектральний аналіз вібрацій в різних точках обладнання [103, 108]; встановлені особливості часу запізнювання реакції уздовж лінії приводу клітей і між клітками через смугу та його діагностичні властивості [65, 74].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на: XVI Міжнародній науково-технічній конферен-

ції «Приладобудування: стан і перспективи». (м. Київ, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні методи, інновації та досвід практичного застосування в галузі технічних наук» (м. Радом, Польща, 2017 р.); XIX Міжнародному колоквиумі з механічної втоми металів (м. Порто, Португалія, 2018 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Надійність та динаміка важких машин RDHM» (м. Дніпро, 2018р.); XXII Міжнародній конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики» (м. Одеса, 2018 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Машини і пластична деформація металу» (м. Дніпро, м. Кам'янське, 2018 р.); Науково-технічному семінарі «Сучасні технології неруйнівного контролю та їх застосування в промисловості» в рамках XVII Міжнародного промислового форуму (м. Київ, 2018 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Університетська наука – 2019» (м. Маріуполь, 2019 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях: «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM-2018» (м. Дніпро, 2018 р.), «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM-2020» (м. Дніпро, 2020 р.) та «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM-2021» (м. Дніпро, 2021 р.); XXIII Міжнародній конференції «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану» (м. Одеса, 2020 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Машини та технології обробки металів тиском» (м. Запоріжжя, 2020 р.)

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 25 наукових працях, в тому числі: 13 статей у наукових фахових виданнях, затверджених ДАК МОН України, 2 з яких опубліковані у виданнях, що індексуються у міжнародних науково-метричних базах Scopus і Web of Science, 2 статті – додаткові; 12 матеріалів праць і тез науково-технічних конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів з висновками по кожному розділу, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел (111 найменувань, з урахуванням публікацій автора) та додатків. Дисертацію оформлено в одному томі. Загальний обсяг роботи складається з 215 сторінок тексту і містить: 112 рисунків, 19 таблиць та 2 додатка.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Конструктивні та технологічні особливості безперервних широкоштабових станів

При розробці систем вібраційної діагностики будь-яких машин, агрегатів і механізмів різного типу та призначення враховують умови і режими їх роботи, особливості конструкції і технології виробництва. Клас безперервних широкоштабових станів гарячої прокатки багато в чому має певну спільність в частині конструкції і технології прокатки. У той же час є і певні відмінності аж до істотних. Розглянемо їх на прикладі стану 1680 МК ПрАТ «Запоріжсталь» (рис. 1.1).

Стан складається з п'яти чорнових клітей – двохвалкової горизонтальної кліті ДУО і чотирьох клітей (№ 1 - №4) кварто. Лінія головного приводу робочих валків складається з універсальних шпинделів з бронзовими вкладишами, шестеренної кліті (два валка з шевронним зачепленням), корінної муфти, що з'єднує нижній

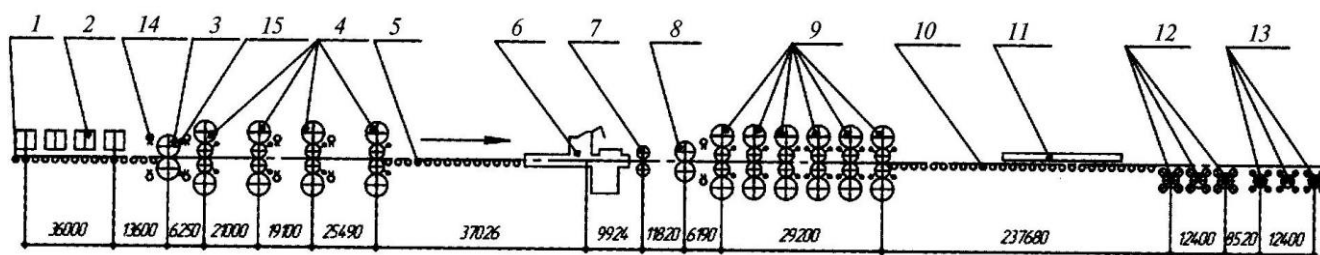


Рисунок 1.1 – Схема розташування обладнання безперервного стану гарячої прокатки 1680 ПрАТ «Запоріжсталь»:

- 1 - рольганг пічний нижній; 2 - методичні печі; 3 – двохвалкова кліть;
 4 - чорнові кліті; 5 - проміжний рольганг; 6 - ППУ "Койлбокс"; 7- летючі ножиці; 8 - чистовий окалиновідламувач; 9 - чистові кліті; 10 - рольганг за чистовими клітями; 11 - установка охолодження смуги; 12, 13 - моталки;
 14 - система гідрозбиву окалини; 15 - система охолодження валків [1]

шевроонний валок з тихохідним колесом редуктора. Кліті № 1 - № 3 містять двоступеневий редуктор. Відстань між клітьми становить від 6,25 м до 25 м. Швидкість прокатки дорівнює від 0,7...1 м/с в перших клітьх до 2,1 м/с в останній чорновій кліті № 4.

Технологічною особливістю чорнової групи є два основні режими прокатки транзитом, тобто без підігріву слябів в методичних печах: прокатка слябів довжиною L і подвоєною довжиною $2L$. В останньому випадку сляби $2L$ в парах клітей ДУО-№ 1, № 2 - № 3 і № 3 - № 4 прокатуються в безперервному режимі [2, 3]. В такому ж режимі ведеться прокатка слябів в групі чорнових клітей № 3 - № 4 - № 5 стану 2000 ПАТ «Северсталь». Поєднання роздільної (сляби довжиною L) і спільної прокатки (сляби $2L$) в парах клітей призводить до великої різноманітності вібраційних процесів в обладнанні клітей.

Аналіз технології показує, що параметри прокатки змінюються як всередині однієї плавки (партії смуг одного сорторозміру), так і між плавками. Одним з головних параметрів, що визначає умови деформаційного режиму, є температура металу, що прокатується. На стані 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» середнє значення температури вздовж смуги змінюється в наступних межах [4, 5]: перед кліттю ДУО - 1060...1108 °С; за кліттю № 4 - 1060...1090 °С; за кліттю № 10 - 800...810 °С. При цьому розподіл температури вздовж транзитних слябів перед станом в більшості випадків носить наступний характер:

- одиночний "головний" сляб - зростання температури від переднього кінця до заднього, відповідне середині слябової смуги;
- одиночний "нижній" сляб - зниження температури від переднього кінця до заднього (задній кінець слябової смуги);
- сляб подвійної довжини - зростання температури від переднього кінця до середньої частини й подальше зниження до заднього кінця сляба. Коливання температури призводять до зміни динамічних навантажень при захопленні та міжклітьового зусилля під час безперервної прокатки.

Чистова безперервна група складається з окалиновідламувача ДУО і шести клітей кварто № 6 - № 10. Всі кліті мають в складі одноступінчастий редуктор, в

той час як в більшості інших станів (1700, 2000, 2500) лінії приводу безредукторні. Відстань між клітьми 6 м. У чистових клітьх швидкість прокатки (захоплення смуги) в залежності від сортаменту змінюється в значно більших межах. У першій чистової кліті від 1,4 до 1,8 м/с, в останній від 5,6 до 8,1 м/с [1].

Відхилення товщини слябів в партії на вході в стан становить 2...5 мм, ширини 10...45 мм, а коливання товщини смуги на вході в чистові кліті 0,5...0,1 мм. Прокатуються смуги різного сорторозміру шириною 900...1500 мм завтовшки 7...2,5 мм. Після чорнової групи смуги товщиною 20...23 мм задаються в проміжний перемотувальний пристрій (ППУ) "Койлбокс" і з нього в чистову групу.

На відміну від машинних агрегатів (насоси, повітродувки, турбіни), які працюють з постійною частотою обертання, прокатним станам притаманні кілька режимів роботи [6]. Зокрема для БШШС гарячої прокатки [7]:

- а) холостий режим, тобто без навантаження, на робочій швидкості;
- б) ударний характер прикладання навантаження в момент захоплення смуги валками;
- в) перехідний процес, обумовлений захопленням смуги;
- г) розгін стану;
- д) усталений режим прокатки;
- в) гальмування стану;
- ж) вихід заднього кінця смуги з валків і перехід в холостий режим.

У всіх режимах вібраційні процеси можуть істотно відрізнятися.

Звідси з'являється природне прагнення використовувати все "багатство" і різноманітність вібраційних процесів в діагностичних цілях. В роботі враховується, що власне вимір (отримання) сигналів є важливою складовою, яка на практиці багато в чому досить добре освоєна. Тому передбачається вирішення низки науково-технічних завдань, результати яких необхідні для інтелектуальної начинки системи, щоб можна було досягти кінцевої мети - розпізнавати стан обладнання.

1.2 Аналіз поломок і відмов обладнання

Є значна кількість публікацій та спеціальних оглядів, в яких наводяться дані про відмови, поломки та аварії обладнання на листопрокатних станах [8-17]. Найбільш серйозними з важкими наслідками для виробництва є пошкодження зубчастих передач в редукторах і шестеренних клітях. Відмічаються такі види ушкоджень зубчастих передач:

- втомні поломки зубів;
- поломки, викликані одноразовим перевантаженням;
- в результаті неприпустимого зносу поверхні зубів;
- поява тріщини та руйнування ободів зубчастих коліс.

Рисунок 1.2 і таблиця 1.1 дають уявлення про поломки устаткування на станах 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» і 1700 ПрАТ «ММК ім.Ілліча».

Таблиця 1.1 – Поломки на стані 1700 ПрАТ «ММК ім.Ілліча» [10]

№№ кліті	1	2	3	4	4а	5	6	7	8	9	10
Число поломок за 3 роки	22	28	17	16	21	61	29	14	22	19	12

Руйнування підшипників редукторів і шестеренних клітей відбувається через незадовільну роботу систем змащення, перевантажень, неприпустимого зносу елементів. Відзначається, що високі статичні під час прокатки і ударні навантаження при захопленні металу валками відносяться до вирішальних чинників, що впливають на роботу та довговічність зазначених вузлів. В роботі [12] відзначається, що довговічність підшипників в шестеренних клітях коливається в межах 3-6 років, а за 17 років експлуатації стану вийшли з ладу 66 підшипників кочення.

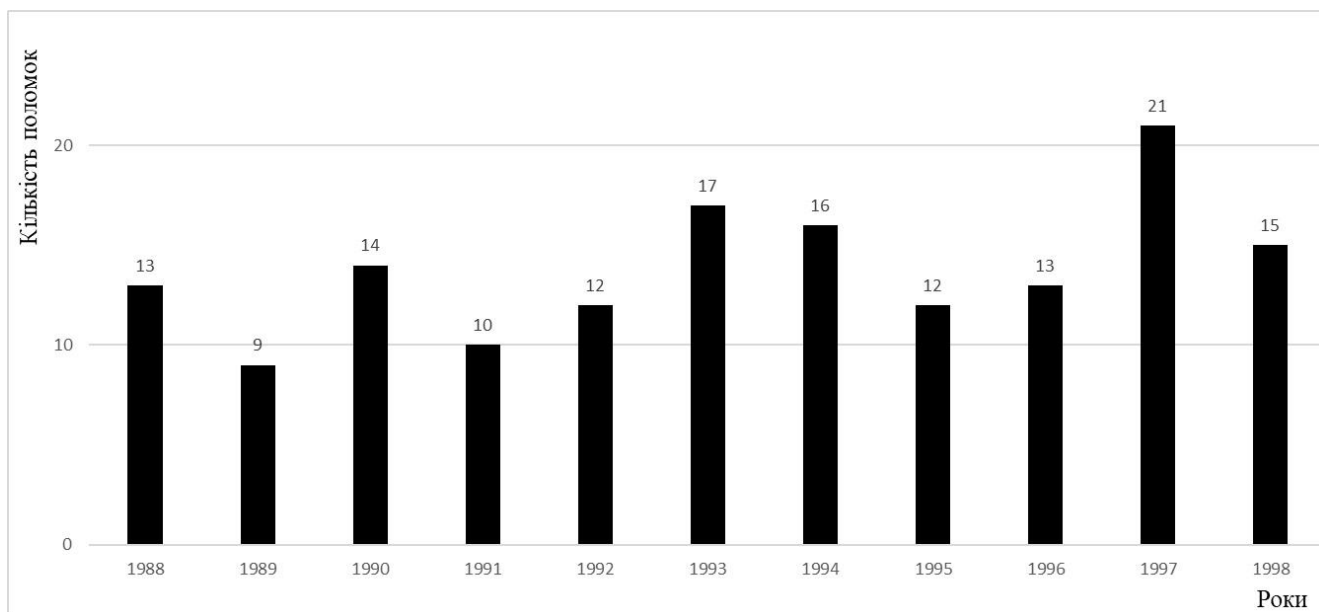


Рисунок 1.2 – Діаграма кількості поломок механічного обладнання чорнової групи клітей стану 1680 [16]

Знос та зазори в зчленуваннях при взаємодії зубів зубчастих коліс, а також їх цапф в підшипникових опорах призводять до їх динамічної взаємодії. Вертикальні складові передаються на корпусні і кріпильні деталі. В результаті з'являється вібрація корпусного обладнання, як показують публікації [18-22] тим інтенсивніше, чим більше знос і зазори. Це призводить до інтенсивного зносу з'єднувальних поверхонь, до зниження зусиль затягування стяжних болтів. У зв'язку з викладеним особлива увага приділяється діагностиці технічного стану редукторів і шестеренних клітей.

Оскільки дана робота присвячена обґрунтуванню, розробці та створенню системи вібраційної діагностики для БШШС 1680, наведемо деякі дані МК ПрАТ «Запоріжсталь» (вих. № 26/2052794 від 07.07.2014 р). Протягом з початку 2001 року по березень 2014 року на стані було проведено 106 замін обладнання: 68 в редукторах, 49 в шестеренних клітях, в тому числі з причини аварій відповідно 15 і 12 замін. При цьому вартість вузлів силового редуктора і шестеренної кліті лінії приводу тільки чорнової кліті № 1 склала $185 \text{ т} \times 12000 \text{ \$ USD} = 2220000 \text{ \$ USD}$; а чистової кліті № 6 – $73 \text{ т} \times 12000 \text{ \$ USD} = 876000 \text{ \$ USD}$. Як бачимо, витрати на відновлення працездатності обладнання лінії приводу окремих клітей вельми істотні.

Рис. 1.3 дає уяву про вагу замінених вузлів. загальна вага по всіх клітях дорівнює 2791 т, що складає вартість $2791 \text{ т} \times 12000 \text{ \$ USD} = 3348 \cdot 10^4 \text{ \$ USD}$.

У БШШС гарячої прокатки застосовуються універсальні шпинделі з бронзовими вкладишами. Згідно з даними агрегатних журналів заміна вкладишів виконується при виробленні 8...10 мм, знос зіву вилок шпинделів досягає 5...8 мм. Знос та породжувані ним кутові зазори в шпиндельному зчленуванні призводять в першу чергу до суттєвих ударних навантажень на всіх ділянках лінії приводу під час захоплення смуги валками. Дисбаланс що утворюється при цьому в голівках шпинделів викликає посилення вібраційних процесів валкових опор, стоек робочих клітей, що додатково позначається на різнотовщинності готового прокату [22-24]. Аварійні простої листопрокатних станів через поломки елементів шпиндельних з'єднань складають 12...15% від загального числа простоїв по механічним причин [10].

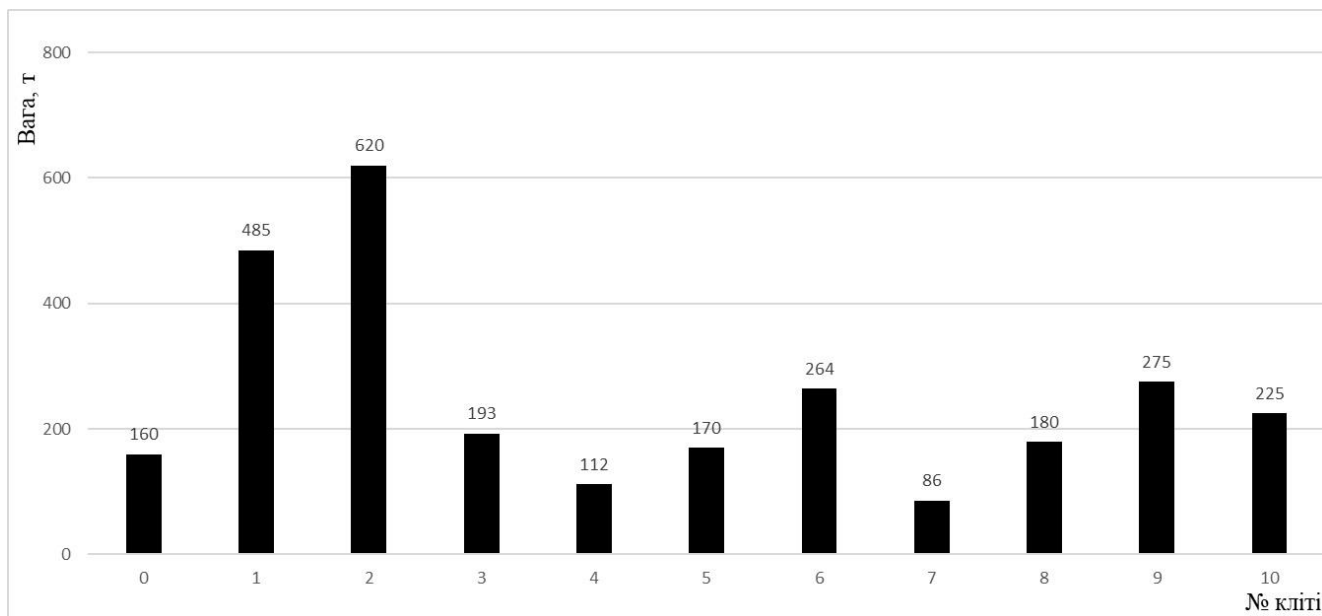


Рисунок 1.3 – Вага вузлів, що замінилися по лініях приводу клітей за 14 років (дані МК ПрАТ «Запоріжсталь»)

1.3. Проблематика розробки систем моніторингу і діагностики для прокатних станів

У практиці експлуатації широкоштабових станів до теперішнього часу в якості основної застосовується система планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Наприклад, згідно з даними агрегатних журналів на стані 1680 такі ремонти здійснюють один раз на місяць, іноді вони проводяться позапланово в зв'язку з аварією, що сталася, або серйозною поломкою в редукторі чи шестеренній кліті. В кінці кожного року (листопад) проводиться капітальний ремонт, пов'язаний з розбиранням редукторів. За даними (рис. 1.2) можна визначити, що чорнові кліті стану 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» протягом року 6-7 разів стан зупиняють на ремонт через необхідність позапланового обслуговування редуктора або шпіндельних з'єднань.

Добре відомі переваги технічного обслуговування з урахуванням фактичного поточного стану обладнання [19-21, 25-28]. Це можливо в тому випадку, якщо прокатний стан оснащений системою моніторингу ТС і діагностики за параметрами вібрації. Тенденція впровадження таких систем на прокатних станах вимагає розробки особливих підходів, що враховують специфіку технології прокатки і конструкції обладнання [29-31]. У роботах [25-28] розглядається ряд організаційних і концептуальних питань впровадження та застосування систем технічного діагностування в металургійному виробництві і на прокатних станах. Зокрема, зазначається, що у вибіркового та періодичного контролю устаткування за допомогою переносної апаратури задіяні від 1-2 до 20-30 чоловік. На таких підприємствах відсутні виразна технічна політика і план розвитку. Найчастіше купувалися дешеві або перші-ліпші прилади та системи. Керівництво піддавалося на «переконливі» аргументи реклами, в той час як такі системи потребують у операторів високої кваліфікації, про що розробники замовчували. Сюди слід віднести і інші негативні моменти. Керівництво підприємства не отримує від служби діагностики негайних результатів, тому настає розчарування. Подібне сталося на ПрАТ «ММК ім. Ілліча». Тут була організована спеціальна діагностична служба, добре оснаще-

на сучасними переносними приладами. Вони призначалися також для діагностування БШШС гарячої прокатки 1700. Однак по ряду непрямих ознак і даних використання переносних приладів і систем не дало очікуваного ефекту.

В роботі [25] в загальних рисах зазначається, що відповідальне, дороге обладнання, що відіграє істотну роль у виробництві та економіці, слід оснащувати стаціонарними засобами технічного діагностування.

БШШС гарячої прокатки складаються з 10-12 клітей, в кожній з яких свої деформаційні, силові, швидкісні і температурні умови роботи. Це призводить до суттєвої відмінності зносу обладнання і темпів його розвитку. Очевидно, що обслуговуючому персоналу (механікам, електрикам, керівництву) необхідно знати поточний стан всіх клітей стану, щоб планувати ремонтні роботи. Є ще один фактор – доступ до місць установки датчиків може виявитися незручним або навіть неможливим, наприклад, підшипники опорних або робочих валків, з міркувань техніки безпеки перебування персоналу поблизу обладнання, яке обертається з великою швидкістю.

У порівнянні з іншими агрегатами БШШС гарячої прокатки відрізняються тим, що після короткочасного перехідного процесу при захопленні смуги валками настає порівняно тривалий період стаціонарної прокатки (а перед захопленням холостого ходу). Його досить для отримання необхідного обсягу вимірювальної інформації та подальшої її обробки.

Більшість вузлів клітей БШШС і ліній головного приводу конструктивно подібні, в той час як значення параметрів технології помітно відрізняються. Однак смуги (заготовки), що задаються в стан одного сорторозміру проходять послідовно всі кліті. Вони несуть з собою певні збурення. Якщо вимірювання при прокатці кожної смуги здійснювати у всіх клітях, представляється можливим встановити нові закономірності та зв'язки технології з обладнанням. У зв'язку з викладеним, на БШШС гарячої прокатки доцільно встановлювати стаціонарну систему вібраційних вимірювань, моніторингу та діагностування обладнання.

На стані 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» в 2012-2013 роках впровадили прокатку економічно вигідної продукції – смуг товщиною 1,5 мм, однак більш «важкої» по

навантажувальним умовам. В результаті збільшилася кількість поломок обладнання. Відсутність на стані будь-якої діагностичної системи не дозволяло своєчасно визначати розвиток зносу і дефектів. Наявність подібної системи може сприяти більш успішному освоєнню прокатки нових сорторозмірів і енергозберігаючих технологій.

Проблемними питаннями є архітектура стаціонарної системи, оскільки відстань (отже, і ліній зв'язку) від першої кліті до останньої на БШШС може становити до 300 м. Також періодичність вимірювань, представлення інформації у візуальному вигляді, обґрунтування допустимих (граничних) значень вібропараметрів в різних точках обладнання. Такі питання вказують на те, що для БШШС гарячої прокатки необхідні обґрунтування та розробка загальної концепції стаціонарної системи діагностики.

Для прокатних станів ще мало вивчені такі питання як раціональне розміщення вібродатчиків, пошук ділянок і місць, в яких в найбільшій мірі проявляються вібраційні ефекти, пов'язані з неполадками. Не вирішені питання шляхів поширення вібросигналів, зокрема, ударного імпульсу при захопленні смуг валками. При розташуванні підшипників різних типів поблизу один до іншого і зубчастих зачеплень, що має місце в прокатних станах, потрібна розробка методів поділу дефектів в них.

Ще один момент полягає в організації взаємодії системи діагностування з цеховими інформаційними системами. Наприклад, в агрегатних журналах міститься інформація про дати та обсяги ремонтних впливів, у базі АСУ систематизований прокатаний сортамент і момент (навантаження) головного приводу (електродвигуна) при прокатці кожної смуги.

Нарешті, слід враховувати, що стаціонарна система на багатоклітьовому безперервному стані включає 100-150 вібродатчиків. В результаті в базах даних збирається величезний обсяг корисної інформації. Однак як такою вона стане лише тоді, коли виявиться затребуваною з метою отримання нових знань. Тому необхідно розробити методичну основу для того, щоб діагностичні служби знали, як проводити пошук нових знань з метою підвищення діагностичної інформативнос-

ті системи, розробки нових способів та вдосконалення відомих. Іншими словами, необхідно включити творчий та науковий потенціал для дослідницької роботи над базами даних вимірювань.

1.4. Аналіз систем вібраційного діагностики механічного обладнання прокатних станів

В останні два десятиліття з'явилася значна кількість публікацій, які свідчать про впровадження діагностичних приладів і систем на прокатних станах різного типу. Розгляду піддаються різноманітні аспекти розробки і створення архітектури систем вимірювання та діагностики, питання використання інформації про ТС механічного устаткування при проведенні ремонтів, питання економіки, якості продукції та ін. Наприклад, в БШШС холодної прокатки виникла проблема з високо-частотною вібрацією прокатних клітей, яка призводила до утворення поперечної хвилястості смуг [32, 33]. Розробці та створенню систем, що дозволяють усунути дане явище, передувала велика кількість публікацій [32-37]. У них досліджувалися характер дефекту на смузі, частотні характеристики клітей, технологічні параметри прокатки, власне динамічні процеси в устаткуванні, висловлювалися і обґрунтовувалися причини подібних явищ. Накопичення певних знань про це явище в кінцевому підсумку дозволило глибше встановити його причини та розробити діагностичну систему для його попередження. Інтенсивно розвивається діагностика металургійного обладнання за кордоном [18, 38-50].

В роботі [42] наводиться загальний опис системи спостереження RoCoCo, розробленої спеціально для прокатних станів. Система складається з трьох вимірювальних систем. Система MiDaS (Mill Diagnostic System) призначена для вимірювання, реєстрації та аналізу сигналів коливань прокатних клітей і попередження таких явищ, як гудіння або тремтіння під час прокатки. Система ДТЕСТ призначена для діагностики підшипників кочення клітей та редукторів, з обробкою сигналу по методу огибаючих кривих із застосуванням алгоритмів нечіткої логіки.

Одна система розрахована на підключення до 256 сенсорів до одного вимірювального комп'ютера. Система TAS призначена для спостереження за моментом обертання в валах ліній головного приводу. Вимірювання моменту здійснюється за допомогою наклеєного на вал тензометричного датчика.

У роботах [46, 47] звертається увага на інформативність крутного моменту в лінії головного приводу валків. Даний момент є одним з основних параметрів, що характеризує навантаженість обладнання і багато в чому процес прокатки. Реєстрація з високою частотою моменту і його аналіз дозволяють зробити висновки про якість і стабільності процесу прокатки та отримати інформацію про поточний стан обладнання. Так, шляхом вимірювань моменту за допомогою стаціонарної системи зафіксований випадок поломки зубчастого шпинделя на одному БШШС, поломки валків в рейкобалковій кліті. У багатьох публікаціях наводяться дані про технічну та економічну ефективність роботи впроваджених на прокатних станах систем діагностики [44, 46]. Наприклад, один порив смуги на стані холодної прокатки призводить до втрати близько 100000 \$ USD. При 10 обривах система попередження коливань типу гудіння окупиться за кілька тижнів. В останнє десятиліття в Україні видано ряд монографій, присвячених питанням вібраційної діагностики металургійного устаткування і в тому числі прокатних станів [19-21, 26, 27, 51].

Слід зазначити, що всі системи призначені для стаціонарно обертового обладнання. У них використовуються відомі методи спектрального та кореляційного аналізу, пік-фактору, побудови трендів і гістограм та інші. Прокатні стани різного типу, як зазначалося, мають специфічні технології, режими роботи та конструкцію обладнання. Це вимагає інших підходів до розробки та створення діагностичних систем.

В ІЧМ НАНУ обґрунтовано та отримав розвиток новий напрямок – розробка нових методів, способів і прийомів діагностики ТС обладнання клітей і головних ліній прокатних станів на основі використання властивостей та параметрів вібродинамічних процесів в перехідних режимах роботи [21, 52-57].

Стосовно до БШШС (1680, 1700, 2000 і 2500) отримана велика база перехідних процесів, встановлені їх параметри (частота та загасання коливань) і особливості зв'язку з технологічним процесом та станом обладнання. Більшість нових методів і способів діагностування обґрунтовано, підтверджено в промислових умовах на діючому стані, показана їх працездатність.

Суттєве значення нових способів полягає в тому, що вони отримані не тільки шляхом математичного моделювання, а й дослідно-промислових вимірювань. При цьому вимірювання крутного моменту в лініях головного приводу виконувалися одночасно з вимірюваннями вібрації корпусного обладнання уздовж лінії (шестеренній кліті, редуктора, електродвигуна). Це дозволило встановити взаємозв'язок перехідних процесів в пружній системі кліті, лінії приводу та вібрації обладнання.

Незважаючи на те, що частина нових способів реалізовувалася в режимі дослідної системи вимірювань, вони залишаються до теперішнього часу не залученими в процес їх впровадження в постійно діючу систему вібродіагностики. З огляду на високу ефективність нових способів розробки ІЧМ НАНУ, в даній роботі поставлена задача суміщення методів і способів діагностики за параметрами сталого і перехідного процесів. Це може істотно збагатити і поглибити процес діагностування та підвищити його достовірність.

Запропонована металургійним підприємствам різноманітна вібровимірювальна апаратура [25] використовується для діагностування стаціонарного обертового обладнання. Її застосування в прокатних станах, особливо в безперервних багатоклітьових ускладнено з ряду причин. Під час роботи стану виконання вимірювань вібрації пов'язане з небезпекою. Результати вимірювань при роботі в холостому режимі, тобто при відсутності навантаження, не настільки інформативні, як вимірювання при навантаженні. Розроблені правила розпізнавання ТС обладнання орієнтовані на стаціонарні режими, в той час як перехідні режими мають також суттєву інформативність.

Головна причина досить тривалого затяжного процесу широкого використання на прокатних станах вібровимірювань в діагностичних цілях полягає в тому, що провідні фірми-виробники приладів не займаються розробкою концепції і

власне систем вібраційного діагностування обладнання клітей і головних приводних ліній валків, особливо для багатоклітьових безперервних прокатних станів. Немає відповідей на наступні питання: Яка повинна бути система: переносна, напів- або стаціонарна? В роботі [25] розглядаються загальні принципи побудови систем моніторингу та діагностики машин.

Розробка концепції і власне системи гальмується відсутністю «начинки», тобто способів діагностування, їх детального опису, подання правил розпізнавання ТС. Їх виклад, формулювання і алгоритми закладаються в основу системи, від них залежить її концепція і структура.

Наприклад, прокатний стан (кліть) працює в декількох режимах: холостий хід, захоплення смуги валками, розгін стану, сталий процес прокатки, гальмування для прокатки ділянки смуги зі звареним з'єднанням (смугові стани холодної прокатки), розгін, викид смуги і т.п. Кожен з них має певну інформативність, пов'язану з ТС. Чим більше розроблено діагностичних способів для зазначених режимів, тим глибше система та визначення ТС. Для сталих режимів роботи (холостий хід, прокатка) можуть бути застосовані відомі способи діагностування, засновані на кореляційному, спектральному, пік-факторному та інших аналізах. Для перехідних режимів потрібна розробка своїх специфічних способів діагностування. Такі способи розроблені в ІЧМ НАНУ (м. Дніпро) спільно з НПО «Донікс» (м. Донецьк) та ПрАТ «Запоріжсталь» [53-57]. У них використовуються параметри процесів, що формуються в обладнанні при захопленні смуги валками. Дані процеси мають істотну інформативність і обумовлені не тільки захопленням смуги, але також зносом зчеплень деталей та утвореними внаслідок цього зазорами.

За даними вібровимірювань в перехідних режимах визначається стан обладнання лінії приводу і її ділянок в частині зносу та зазорів, наприклад, в шпиндельному зчленуванні, в підшипникових опорах валів редуктора і шестеренній кліті. У сталому режимі – стан підшипників та зубчастих зачеплень.

Очевидно, що в обох режимах доцільно використовувати єдині джерела інформації (вібродатчики). У кожному режимі є «своє» коло параметрів ТС і їх визначення здійснюється за своїми способам та правилами розпізнавання.

Металургійним підприємствам пропонуються різні вібровимірювальні прилади та системи з програмним забезпеченням для використання в діагностичних цілях. Аналіз показує, що обладнання прокатних станів, перш за все, механізми та вузли клітей і головних ліній в цьому відношенні залишаються не охопленими. У широкому сенсі за кордоном і в Україні вібродіагностичні системи як такі для прокатних станів відсутні. Не розроблена концепція такої системи, наприклад, стосовно безперервних багатоклітьових станів, зокрема, БШШС гарячої прокатки.

Певні проблеми розробки систем діагностування для прокатних станів викладені в роботі [26]:

- відзначаються фактори, які перешкоджають успішному впровадженню методів і засобів вібродіагностики;
- особливості технологічного процесу, зокрема, відсутність стаціонарних режимів роботи станів;
- різноманітність існуючих видів прокатних станів;
- їх металоємність і конструктивна складність;
- доступ до найбільш відповідальних точок утруднений або навіть неможливий з міркувань техніки безпеки;
- чергування різних сортamentів прокату.

Аналіз даної та інших робіт на подібну тему дозволяє зробити деякі висновки. Головний з них полягає в тому, що розробники вібраційних систем недостатньо глибоко ознайомлені з технологічними процесами, режимами роботи і вібродинамічними явищами в обладнанні прокатних станів. Досвіду і своїх результатів вимірювань на діючих станах у розробників приладів явно недостатньо. У той же час висловлюється бажання створити універсальну систему діагностики для прокатних станів з можливістю адаптації її експертного модуля до конструктивних і технологічних особливостей. Автор [58, 59] повідомляє про створення такої системи, в якій закладені адаптовані правила автоматизованої діагностики. Система створена за технічним завданням центру ТОіР ПАТ «ММК» в 2007 році і успішно пройшла дослідно-промислову експлуатацію на сортовому стані 370. Більш до-

кладних відомостей про таку систему крім структурної схеми і того, що вона є стаціонарною, автор не наводить.

На прикладі даної публікації можна побачити, що розробники систем не враховують одну з головних вимог – спочатку необхідно розробити способи діагностування прокатного обладнання разом з правилами розпізнавання ТС. Лише після вибору із запропонованих найбільш ефективних способів останні можуть закладатися в створювану систему.

1.5. Висновки

1. Розглянуто основні конструктивні і технологічні особливості БШШС гарячої прокатки. Виділена та їх частина, яку слід враховувати при розробці систем вібраційного діагностування, зокрема робота в перехідних режимах.

2. Наведені приклади відмов і поломок устаткування станів 1680 та 1700, що підтверджує необхідність оснащення станів діагностичними засобами.

3. Звернута увага на такі проблемні питання як раціональне розміщення вібродатчиків на десяти клітках, розташованих в цеховому прольоті довжиною до 400 м, зв'язок з базою АСУ (технологічні параметри) і агрегатних журналів (дати і обсяги ремонтних робіт), обґрунтування допустимих (граничних) значень вібропараметрів, обробки і представлення результатів моніторингу та вимірювань.

4. Аналіз публікацій показав приклади початку успішної експлуатації систем автоматизованої діагностики стану обладнання на безперервних станах за кордоном і необхідність наукового обґрунтування діагностичних алгоритмів та розробки вітчизняних систем.

Результати, викладені в розділі, опубліковані в роботах [6, 7, 29-31].

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ І РОЗРОБКА НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ ТА ВИМОГ ДО СИСТЕМИ ВІБРАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ СТОСОВНО ДО БЕЗПЕРЕРВНОГО ШИРОКОШТАБОВОГО СТАНУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ

2.1 Аналіз літературних даних по вимірах вібродинамічних процесів

Існуючі системи діагностування роторних машин, що експлуатуються, проблематично встановлювати безпосередньо на прокатні стани. Перш за все, причина полягає у відмінності технологій і циклах прокатки. Так, наприклад, в клітках широкоштабових і дротяних станів час прокатки смуги на два порядки перевищує сталий режим роботи обтискних або станів холодної прокатки труб. Стани істотно розрізняються конструктивними особливостями: двохвалкові (з калібрами), чотирьохвалкові (і більше) кліті, одно - і багатоступінчасті редуктори, поєднанні шестеренні кліті з редуктором, підшипники рідинного тертя і кочення, зубчасті шпинделі і з бронзовими вкладишами. Природно, що кожен з подібних вузлів генерує свої вібрації і по-різному відгукується на діючі збудження, наприклад, з боку технології. Тому до кожного стану необхідний свій підхід при створенні системи діагностики з урахуванням зазначених та інших відмінностей.

Аналіз публікацій з результатами вимірювань для багатьох прокатних станів показує, що в станах різного типу поряд з певною спільністю має місце своя специфіка вібраційних процесів. Це слід враховувати при розробці діагностичної системи.

Узагальнення і систематизація вібраційних процесів в різних станах предмет окремого дослідження. Тому розглянемо вібродинамічні процеси переважно в БШПС з позиції діагностичної інформативності. Подібний підхід характерний для робіт [21, 60]. Його специфіка полягала в тому, щоб розробити методи або способи діагностування тих чи інших вузлів устаткування. Основна увага приділялася перехідним процесам при захопленні смуги валками в окремих клітках. При

цьому малося на увазі, що подібні способи будуть враховані в нових діагностичних системах. Разом з цим у зазначених роботах не дано загальний погляд на прокатний стан (кліть) як систему, яка генерує змінюване під час експлуатації силове та вібраційне поле, що має певну єдність і спільність. Мета запропонованого вперше аналізу полягає в тому, щоб охопити різноманіття коливальних явищ в однотипних станах та встановити загальні закономірності і їх зв'язок з режимом роботи і станом обладнання, тобто під діагностичним кутом зору.

Аналіз публікацій показує, що спочатку (1960-1980 рр.) основна увага приділялася розгляду перехідних процесів по моменту сил пружності [60-64]. Мали місце поодинокі випадки складних вимірювань одночасно декількох параметрів в одній кліті. На початку 1990-х років з'явилися статті з вимірюванням вібрацій в прокатних станах. Результати вимірювань аналізувалися переважно на предмет з'ясування причин високої динаміки або зв'язку вібрації з якістю прокату. Однак прокатний стан, тим більше багатоклітьовий з безперервною прокаткою, і навіть одна кліть, є складною системою з взаємодіючими частинами. В роботі [64] на підставі вимірів показано взаємодію динамічних процесів вібрації у деяких вузлах лінії приводу валків.

У даній роботі виконано цілеспрямований аналіз публікацій і вимірювань з тим, щоб виявити системи з подібною взаємодією і розглянути їх з точки зору діагностичної інформативності. Виявилося, що можна виділити кілька парціальних систем, в яких одночасно формуються близькі або аналогічні перехідні процеси. Спільний розгляд цих систем, їх синтез дозволить розробити обґрунтовані вимоги до систем вимірювань, моніторингу та діагностики, а також нові способи визначення ТС обладнання [65].

Лінія приводу - валки. Частота коливань кутової швидкості обертання обох валків збігається з частотою коливань моменту на шпинделях (рис. 2.1). Амплітуда коливань швидкості робочого валка становить 23%, опорного 17% відносно номінальної перед захопленням. Період T і частота f коливань моменту на обох шпинделях збігаються та становлять під час розмикання зазорів $T_1 = 0,08$ с і $f_1 = 12,5$ Гц, а при вільних коливаннях $T_0 = 0,06$ с і $f_0 = 16,7$ Гц. Синхронні кут-

ві коливання верхнього робочого валка та моменту на шпинделях отримані в одній з клітей БШШС гарячої прокатки 2000 (рис. 2.2). Тобто виявляємо зв'язок між крутильними пружними коливаннями лінії приводу та коливаннями кутової (обертальної) швидкості робочого і опорного валків, що може мати діагностичну цінність.

Лінія приводу - прокатна кліть. Обидві пружні системи володіють різними власними частотними характеристиками. У крутильній системі механічний мо-

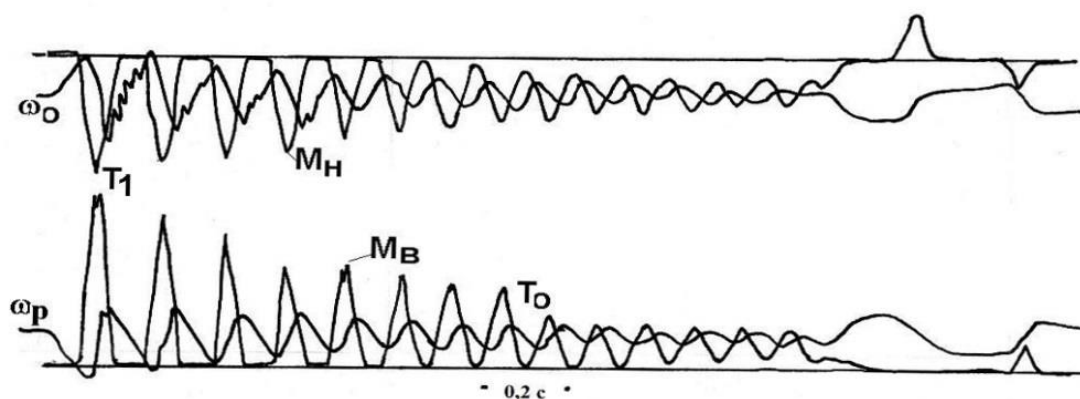


Рисунок. 2.1 – Момент сил пружності на верхньому (в) і нижньому (н) шпинделі і кутова швидкість ω робочого (р) і опорного (о) валків після захоплення смуги. Стан 2800 ПрАТ «Запоріжсталь» [66]

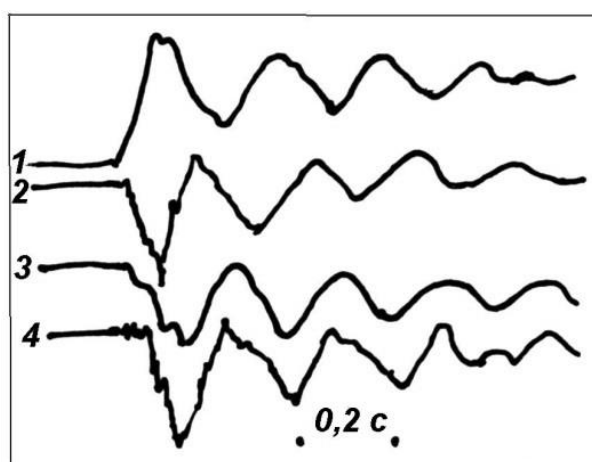


Рисунок 2.2 – Захоплення смуги, обрізаної на всю ширину:

1, 3 - момент на верхньому і нижньому шпинделі; 4 - момент між якорями двигуна; 2 - кутове переміщення верхнього робочого валка [67]

мент коливається на першій (нижчій) власній частоті. У кліті в перший момент з'являється незначна високочастотна складова коливання (рис. 2.3).

Вони відповідають власній частоті коливань пружної системи кліті. Ця складова швидко згасає і далі настають вимушені коливання з частотою коливань лінії приводу.

Подушки валків - стійки кліті. Між подушками валків і опорними площинами вікон станин кліті є монтажні зазори, необхідні при перевалці валків. Через зношеність зчленувань вони досягають 1,34...4,25 мм при допуску 1,2 мм [69]. У режимі холостого ходу через зсув осей робочих валків щодо опорних по ходу прокатки подушки робочих валків притиснуті до лап подушок опорних валків. При захопленні смуги відбувається зворотний удар подушок про задні лапи подушок опорних валків. Після заповнення осередку деформації ($\sim 0,05$ с) тривають коливання валків, кутової швидкості $\Delta\omega$ горизонтальної складової зусилля прокатки і коливання подушок уздовж осі прокатки (рис. 2.4 – рис. 2.6). Важливо, що частота коливань подушок збігається з частотою коливань моменту на шпинделях. Ударний характер навантажень сприймається підшипниками робочих валків, що є однією з причин їх поломок. Згідно з даними робіт [69, 70] максимальні удари досягають 500...800 кН.

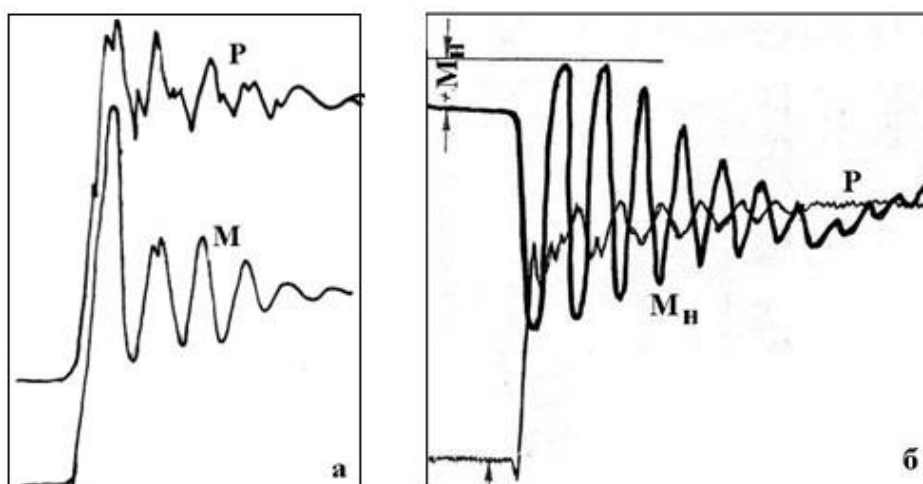


Рисунок 2.3. – Коливання моменту M_H в нижньому шпинделі і зусилля P прокатки при захопленні смуги в кліті № 4 стану 2000 ПАТ «НЛМК» (а) і стану 2800 (б) ПрАТ «Запоріжсталь»[68]

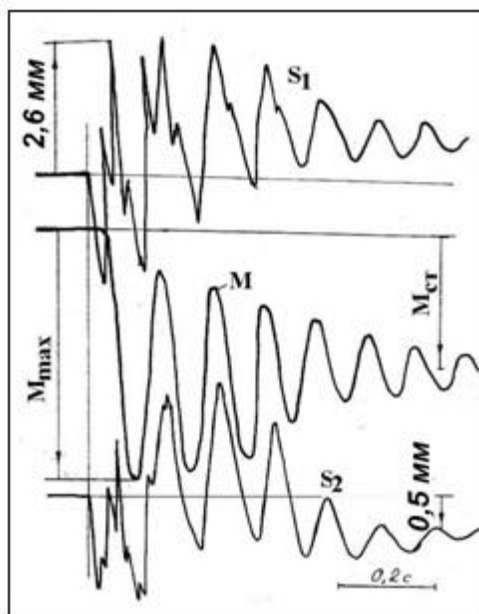


Рисунок 2.4 – Момент M на нижньому шпинделі і переміщення подушок нижнього робочого валка з боку приводу S_1 і перевалки S_2 при захопленні смуги.

Кліть № 7, стан 2000 ПАТ «Северсталь» [60]

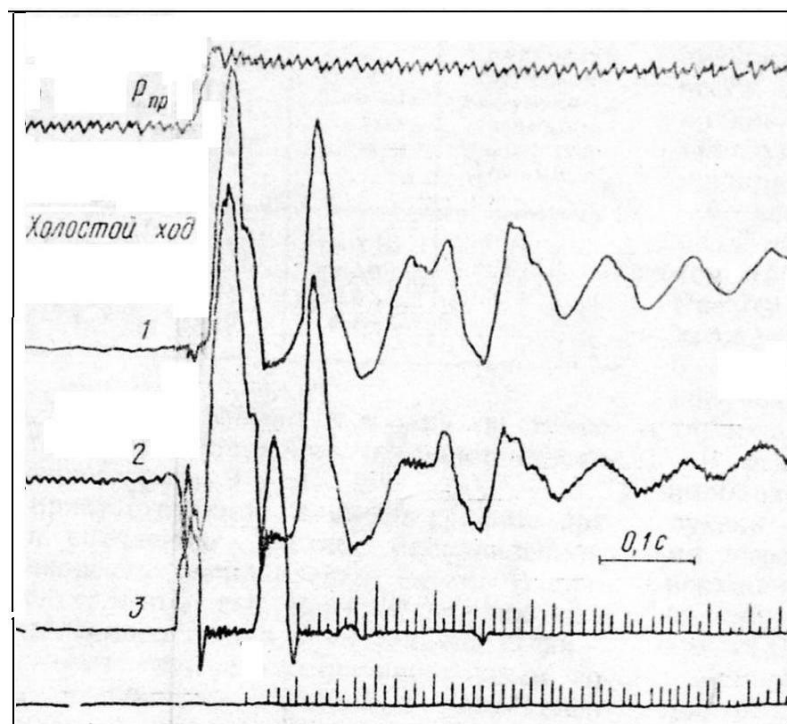


Рисунок 2.5 – Горизонтальні навантаження, що діють на накладки опорних валків: 2, 3 - навантаження на передні накладки з боку приводу і перевалки відповідно; 3 - навантаження на задню накладку з боку перевалки; $P_{пр}$ - зусилля прокатки [69]

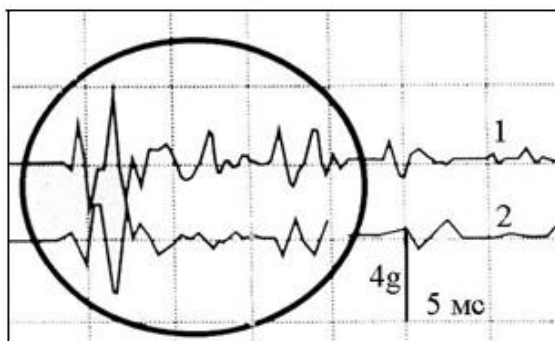


Рисунок 2.6 – Прискорення стійки станини на вхідній стороні кліті при захопленні смуги валками [70]

Лінія приводу - редуктор. Власні коливання лінії приводу через силовий зв'язок в зубчастому зачепленні передаються корпусу редуктора та фундаментним болтам, викликаючи в них вимушені коливання. На (рис. 2.7) добре видно, що перші два піки в зусиллях болтів збігаються з піками моменту на швидкохідному валу. Час згасання коливань зусиль в болтах збігається з згасанням моменту між двигуном і редуктором. Подібні результати отримані в роботі [60].

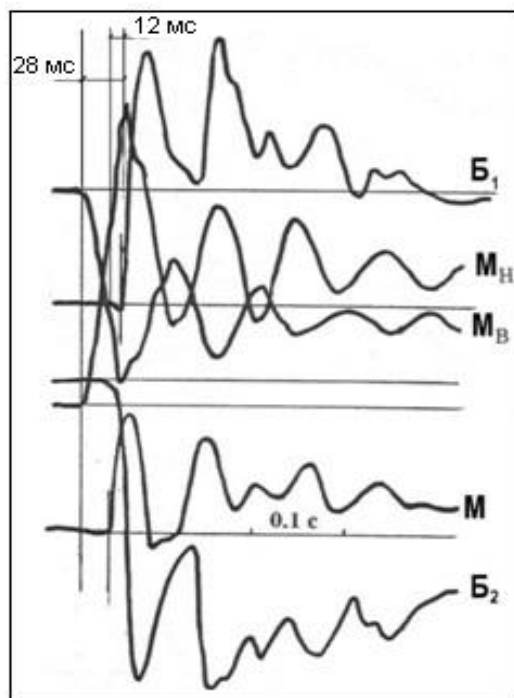


Рисунок 2.7 – Момент сил пружності на валу між двигуном M , на верхньому M_B і нижньому M_H шпинделях, зусилля в фундаментних болтах B_1 , B_2 редуктора при захопленні смуги валками кліті №3 стану 2000 ПАТ «НЛМК» [60]

Лінія приводу - електродвигун. Частота крутильних пружних коливань ліній приводу, як правило, несуттєво проявляється в перехідних процесах електродвигуна прокатної кліті. Відомо, що дія навантаження при вході смуги в міжвалковий зазор призводить до незначного зменшення частоти обертання ротора та перехідному процесу по току двигуна і споживаній потужності. У ряді робіт показано, що захист лінії приводу по току не ефективний [15, 71, 72].

Останнім часом на стані 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» шляхом вимірювань встановлено певний зв'язок між коливаннями механічного та електромагнітного моменту двигуна. Вимірювання з високою частотою (167 Гц) показали, що в перехідному процесі в частоті обертання ротора та електромагнітному моменті проявляється перша частота власних механічних коливань лінії приводу (рис. 2.8). Амплітуда механічних коливань істотно більше (рис. 2.9), однак велике значення має факт збігу періодів коливань. Є підстави вважати, що механічні коливання викликали вимушені коливання частоти обертання та електромагнітного моменту двигуна M_d .

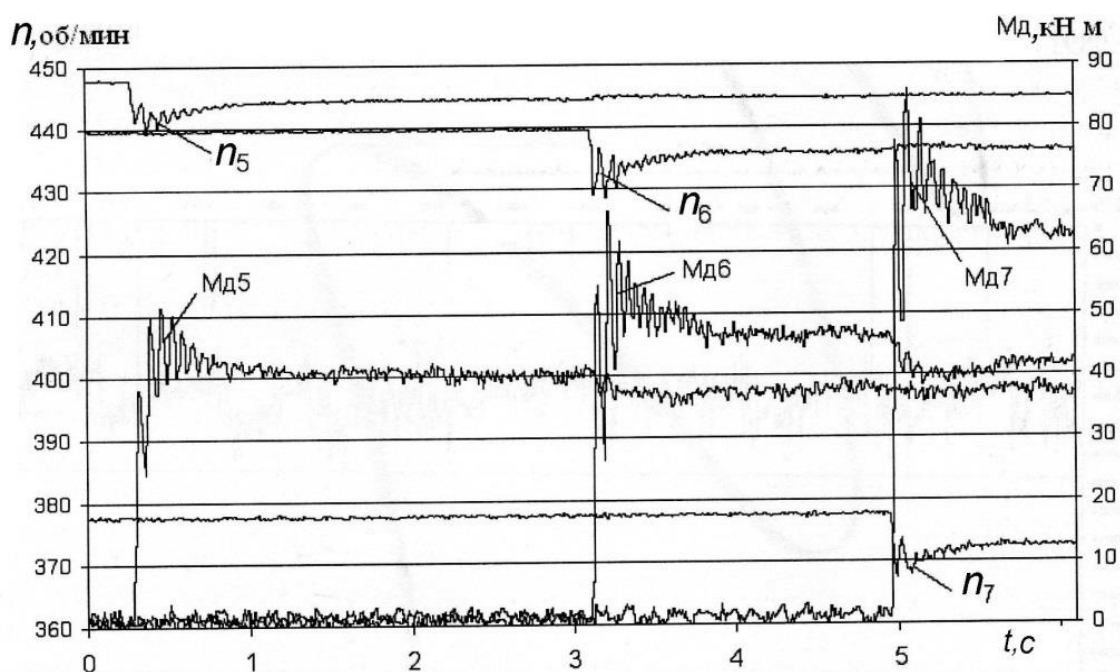


Рисунок 2.8 – Момент двигуна (M_d) і частота обертання двигуна (n) при взаємодії клітей № 5, № 6 і № 7 під час заповнення смугою чистової групи, стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» [73]

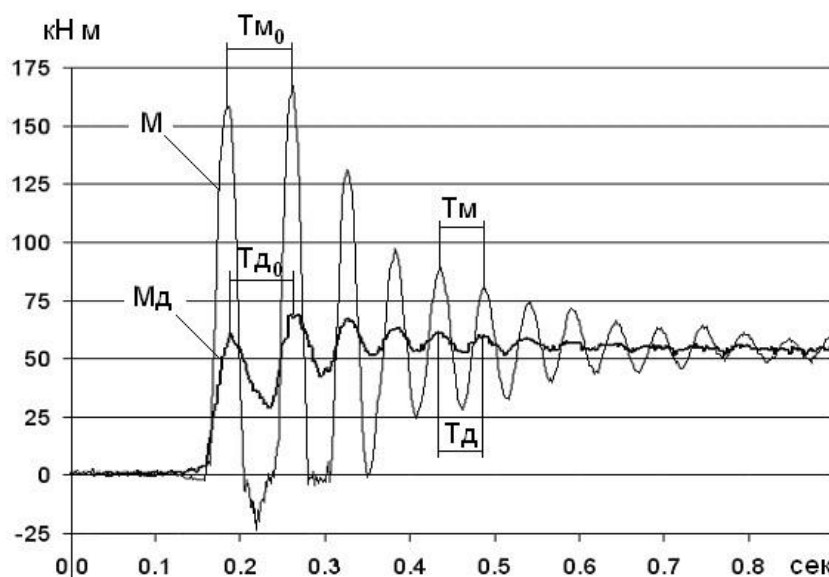


Рисунок 2.9 – Поєднання перехідних процесів моменту механічного M і двигуна M_d при захопленні смуги валками, стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» [73]

Цікавим фактом є те, що момент двигуна M_d зі збільшенням періоду T_{d0} також відгукнувся на розмикання зазору на ділянці двигун – редуктор. Раніше зазначалося, що відношення T_{m0}/T_m може бути використано в якості діагностичної ознаки стану даної ділянки лінії приводу. Очевидно, що таким же показником одночасно може служити також відношення T_{d0}/T_d , оскільки $T_{m0}/T_m = T_{d0}/T_d$. В даному випадку це відношення дорівнює 1,45.

Лінія приводу (пружні коливання) - вібрація обладнання. Процес захоплення смуги валками характеризується істотними ударними і динамічними навантаженнями на всіх ділянках лінії приводу. Він же супроводжується вібрацією корпусного обладнання. Розглянемо приклад з одночасним вимірюванням крутного моменту і вібрації (рис. 2.10).

ТС обладнання оцінили якісно, виходячи з термінів ремонту і заміни шпинделів, зафіксованих в агрегатних журналах. При найкращому стані в кліті № 1 відсутня високочастотна складова вібрації. Майже у всіх точках частота вібропереміщення збігається з частотою крутильних коливань. Відмінність становлять точки 6 та 7, мабуть, через масивну корінну муфту, розташовану між ними. На ділян-

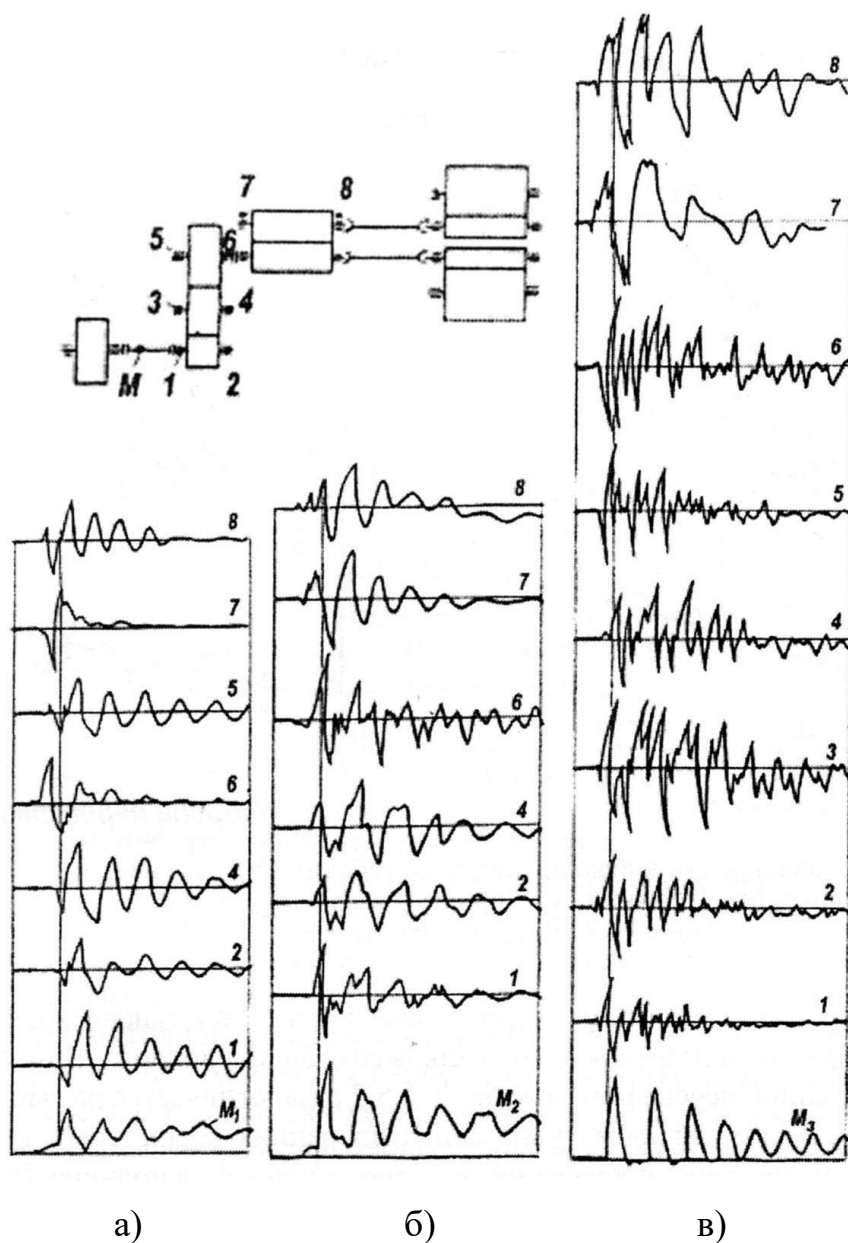


Рисунок 2.10 - Перехідні процеси в устаткуванні клітей № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в) стану 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» при захопленні смуги валками. Точкам 1, 2 ... 8 на кривих відповідає вібропереміщення корпусу редуктора і шестеренній кліті, М - момент сил пружності [74]

ці редуктор - двигун клітей № 1 і № 2 не спостерігалось розмикання зазорів та зворотних ударів (крім випадків буксування валків).

У кліті № 2 обладнання знаходиться в проміжному стані або трохи гірше, ніж в кліті № 1. У деяких точках (1, 8) на частоту крутильних коливань починає накладатися високочастотна складова вібрації.

У кліті № 3 майже на всіх ділянках спочатку спостерігається вібрація з високою частотою. Потім в деяких точках (3, 4, 5) стає помітною складова частоти коливань лінії приводу. На моторній ділянці відбувається чотириразове розмикання зазорів. Це підтримує тривалість високочастотного вібраційного процесу. З розглянутих клітей коефіцієнт динамічності тут найбільший, рівний 4...5. Викладене дозволяє зробити висновок, що стан обладнання в кліті № 3 найгірший. Згідно із записом в агрегатному журналі вимірювання виконані в перед ремонтний період.

Зворотні удари. У лініях головного приводу ряду прокатних клітей при захопленні смуги валками після першого-другого піків моменту на моторному валу відбуваються зворотні удари. Їх пікові значення співмірні з навантаженням в сталому режимі прокатки. Даному явищу раніше не приділялося належної уваги. У зв'язку з цим розглянемо особливості подібних перехідних процесів, причини та умови формування зворотних ударів та їх зв'язок з технологією і обладнанням.

У кліті № 6 дедалі менші зворотні удари відбуваються після перших трьох піків (рис. 2.11). При цьому перший пік моменту менше другого, однак, перший пік зворотного удару максимальний. Після четвертого піку з'явилася коротка поличка з нульовим моментом, яка вказує на без ударне розмикання зазору на ділянці двигун – редуктор. Спостерігаються періоди роботи, коли зворотним ударом супроводжується прокатка всієї партії смуг (рис. 2.12). В інший час подібні удари відсутні.

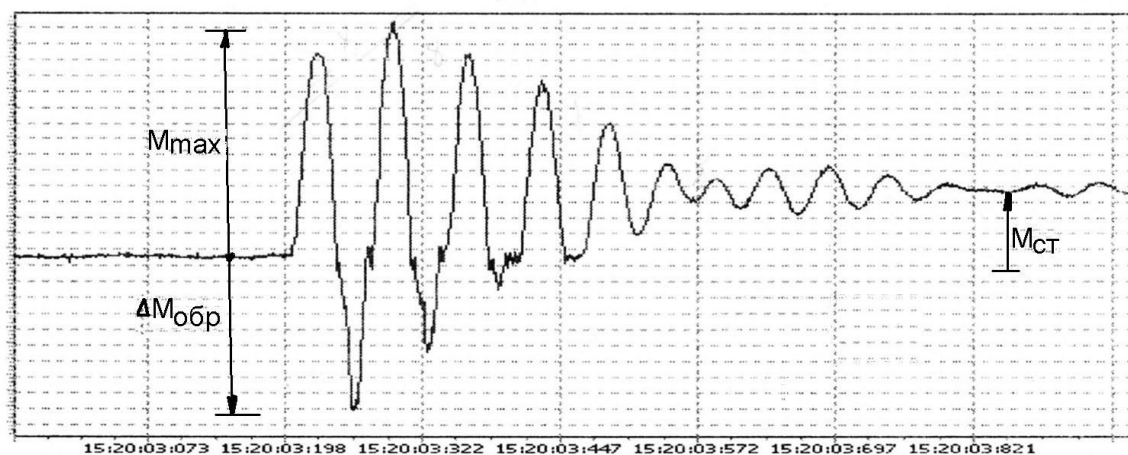


Рисунок 2.11 – Зворотні удари на проміжному валу кліті № 6.

Стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь»



Рисунок 2.12 – Зворотні удари на проміжному валу при захопленні і викиді смуги. Кліть № 5, стан 1700 ПАТ «АрселорМіттал Теміртау»

Аналіз перехідних процесів, вимірювання яких виконані в одних і тих же клітках в різні періоди, показує, що після ремонтів захоплення смуги відбувається без зворотних ударів. Їх прояв починається і потім посилюється через деякий час по мірі збільшення зносу та зазорів в з'єднаннях на шпиндельній і моторній ділянках.

Удари після викиду смуги з валків. У лініях приводу ряду клітей спостерігаються також зворотні і прямі удари після викиду смуги з валків (рис. 2.12). Рівень ударів порівняний зі статичним моментом $M_{ст}$. У цьому відношенні характерний стан кварто холодної посмугової прокатки 2800 з безредукторним приводом валків через шестеренну кліть (рис. 2.13).

При захопленні смуги зворотні удари на шпинделях не відбуваються, хоча після серії піків зазори можуть розмикатися. Після викиду смуги між двома зворотними ударами формується істотний пік моменту. Утворенню подібного процесу сприяють два фактори: - суттєвий момент прокатки та накопичення великої потенційної енергії пружного закручування шпинделів; - зважаючи на велику «пружину» кліті в ряді проходів валки встановлюють в «забій», тобто з попередніми притисненням. Після викиду смуги валки з ударом приходять в зіткнення. Потенційна енергія лінії звільняється, переходить в кінетичну, що викликає потім удари. Подібні процеси відбуваються в чорнових клітках стану 1700 МК ПАТ «АрселорМіттал Теміртау» тільки на проміжному валу між двигуном і редуктором (рис. 2.14).

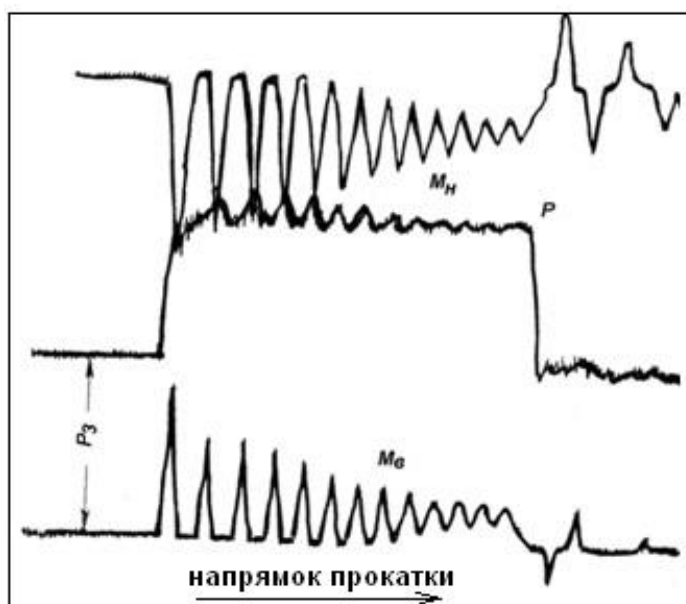


Рисунок 2.13 – Перехідні процеси при захопленні, прокатці та викиді смуги з валків: момент сил пружності на верхньому M_B і нижньому M_H шпинделі і тиск P на ліву станину. Стан 2800 [75, 76]

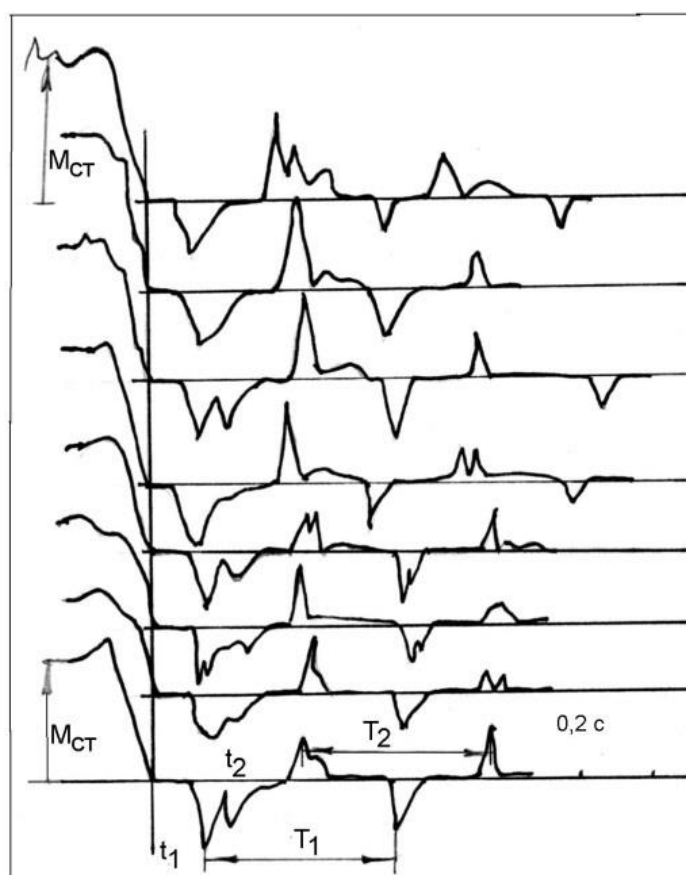


Рисунок 2.14 – Вигляд зворотних та прямих ударів на проміжному валу кліті № 5 стану 1700 ПАТ «АрселорМіттал Теміртау» після викиду смуг [65, 76]

Явище доволі систематичних зворотних ударів після викиду також пов'язано зі зносом зчленувань та зазорами. Його можна використовувати з метою діагностування ТС лінії приводу [77, 78]. Ознакою є періоди між сплесками ударів. При прокатці партії з 24 смуг отримані середні значення величин: $t_1 = 0,15$ с, $t_2 = 0,43$ с, $T_1 = 0,54$ с, $T_2 = 0,53$ с. Вони відповідають тому фактичному стану лінії приводу, коли проводилися вимірювання, і можуть служити для оцінки їх порядку. Шляхом комп'ютерного моделювання встановлено, що чим більше зазор на ділянці між двигуном і редуктором, тим більше періоди T_1 і T_2 . Вимірювання показують, що на удари при викиді смуги реагують вібродатчики, встановлені на корпусі редуктора.

Описані вище явища не тільки цікаві з метою їх пізнання. Зворотні удари являють собою додаткове навантаження, яке при розрахунках обладнання на міцність та довговічність раніше не враховувалося.

Взаємодія двох клітей. Дві кліті та їх взаємодія через смугу що прокочується також можна розглядати як парціальну систему. Під час захоплення смуги валками другої кліті збурення через смугу проти напрямку прокатки передається лінії приводу першої кліті. У цей період в обладнанні та смугі формуються перехідні процеси. Їх інформативність полягає у тому, що по тому, наскільки змінюється момент в лінії приводу попередньої кліті (зменшується, збільшується або без змін) можна оцінювати якість настройки деформаційно-швидкісного режиму. Крім того, визначати їх вплив на повздовжню різнотовщинність прокату, частоту та загасання коливань [79, 80].

Результати вимірювань показують, що коливання моменту в лінії призводять до того, що в кутовій швидкості робочих валків ω з'являється загасаюча коливальна складова $\Delta\omega(t)$. Після захоплення смуги через $\Delta\omega(t)$ вноситься збурення в осередок деформації. Змінюються основні параметри: окружна швидкість на бочці валків та швидкість прокатки v , коефіцієнт тертя μ , опір деформації σ_T , які призводять до коливань зусилля прокатки. Якщо подати зусилля прокатки P як функцію

$$P = P(\sigma_T(v, \mu(v))), \quad (2.1)$$

то в загальному випадку для ΔP отримаємо

$$\Delta P(\omega) = \left(\frac{\partial P}{\partial \sigma_T} \cdot \frac{\partial \sigma_T}{\partial v} + \frac{\partial P}{\partial \mu} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial v} \right) \frac{\partial v}{\partial \omega} \Delta \omega(t). \quad (2.2)$$

У станах гарячої прокатки при $v \leq 5$ м/с мають значення обидві складові. В станах холодної прокатки тільки друга складова, оскільки σ_T від швидкості прокатки практично не залежить. При $v > 5$ м/с і холодної прокатки вплив обох складових не позначається, а під час гарячої прокатки – тільки перша складова.

Таким чином, збіг частоти, періоду та часу загасання коливань зусилля, моменту і швидкості обертання валків вказують на те, що крутильні коливання призводять до вимушених коливань зусилля прокатки та пружної деформації станини кліті. Даний вплив здійснюється через осередок деформації.

Викладені результати вимірювань перехідних процесів дозволяють наступним чином представити взаємодію парціальних вузлів в лінії приводу та кліті. Це необхідно для кращого розуміння їх діагностичної інформативності. Першоджерелом вільних крутильних коливань, як відомо, є ударна дія навантаження до валкової системи. Знос зчленувань та формування через це зазорів істотно впливають на вигляд перехідних процесів і динамічні навантаження. Крім ударного навантаження кліті і лінії приводу після заповнення осередку деформації металом вторинним істотним обуренням є крутильні коливання. Їх вплив проявляється у вигляді коливань кутової швидкості робочих валків через осередок деформації. В результаті тут з'являється змінна складова сил тертя, яка викликає вимушені коливання зусилля прокатки та деформації стійок кліті в вертикальному напрямку та валків разом з подушками в площині прокатки. Негативний вплив кутових зазорів в шпіндельному з'єднанні позначається не тільки на збільшенні першого піку мо-

менту, але і в тому, що його неодноразове розмикання і замикання сприяє підтримці коливань та перешкоджає швидшому їх загасанню.

Підводячи підсумки надано аналіз парціальних динамічних систем з діагностичної точки зору. Тобто, яким чином можуть бути використані коливальні процеси в парах суміжних систем (вузлів) для визначення діагностичних ознак ТС обладнання. Це важливо, оскільки в коливаннях лінії проявляються не тільки частоти підшипників, зубчатих зачеплень, не співвісність, які впливають одне на одне, а ще і збоку валкової системи (ексцентриситет) та смуги, що прокатується (повздовжня різнотовщинність, температурна нерівномірність).

1. Лінія приводу – валки.

Пружні коливання моменту в лінії приводу і як наслідок коливання кутової швидкості робочих і опорних валків. Вимірювання швидкості останніх дозволяє встановити частоту коливань пружного моменту. Це має велике значення в умовах, коли на станах не використовується складна система вимірювання моменту. Знання частоти коливань швидкості валків (тобто моменту) необхідне для порівняння з частотою вібрації обладнання.

2. Лінія приводу – прокатна кліть.

Тут також не складне вимірювання деформації станини кліті, амплітуди і частоти її коливань дозволяє визначати стан системи валки – підшипники – натискні гвинти в частині зносу в вузлах.

3. Подушки валків – стійкі кліті.

Переміщення та вібрація подушок відносно стійок дозволяє визначати знос подушок, бокових планок стійок та опосередковано мати уявлення про ударне навантаження в цих вузлах та можливий вплив на геометрію прокату.

4. Лінія приводу – корпус шестеренної кліті.

5. Лінія приводу – корпус редуктора.

В обох (4 і 5) системах при захопленні смуги амплітуда вібрації корпусу через зубчасте зчеплення відкликається на ударне навантаження та прояв зносу (зазорів).

6. Зубчасте зачеплення – корпус (кришка) шестеренної кліті.

7. *Зубчасте зачеплення – корпус (кришка) редуктора.*

8. *Підшипники валків – корпус шестеренної кліті.*

9. *Підшипники – корпус редуктора.*

У парціальних системах (6–9) взаємодія спостерігається як при захопленні смуги валками (переважно знос і зазори в осях і закріпленні кришки, фундаментних гвинтів), так і під час стаціонарної роботи (холостий хід та прокатка). Це дозволяє, наприклад, встановити стан затяжки кріпильних болтів.

10. *Взаємодія пари суміжних клітей через прокатувану смугу.*

Це питання досить в повній мірі досліджено в роботі [80], але тільки в частині зусилля натягу в смугі. Зв'язок між прокаткою смуги в суміжних клітях та станом обладнання з урахуванням діагностичних властивостей залишається відкритим.

До вищезазначеного треба додати технологічні і режимні особливості прокатаних станів. Для стана 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» це:

- прокатка слябів одинарної і подвоєної довжини, тобто одинарна чи безперервна прокатка в парах чорнових клітей;
- прокатка з використанням перед чистовою групою проміжного перемотуючого обладнання;
- холостий хід, захоплення смуги валками, розгін, сталий режим прокатки, гальмування, викид смуги з валків;
- сортамент смуг за маркою сталі, товщини і ширини;
- температурний режим та режим обтиснень в клітях.

Таким чином, на відміну від важких машин і агрегатів (турбіни, млина та ін.), які працюють в сталому режимі роботи, в прокатних станах має місце різноманіття режимів прокатки, роботи та взаємодії парціальних систем. Тому їх необхідно враховувати при розробці діагностичних систем.

2.2 Обґрунтування вибору найбільш інформативних точок обладнання та періодів вимірювань

Підшипники робочих та опорних валків, шестеренної кліті, редуктора і електродвигуна, а також зубчасті зачеплення є основним джерелом вібрацій, особливо при виникненні якихось неполадок. При цьому як і в інших роторних машинах вібраційні сигнали вимірюються під час усталеного процесу роботи. У зв'язку з цим природно, що вимірювачі вібрації слід встановлювати на корпусному обладнанні поблизу підшипників. Ці вимірювачі одночасно реагують на вібросигнали з боку зубчастих зачеплень.

У загальному випадку в кліті кварто з двоступінчастим редуктором необхідно встановлювати 13 вібродатчиків і один датчик частоти обертання двигуна або робочих валків. У шестеренній кліті щоб підвищити чутливість до вібрації підшипників верхнього і нижнього валка датчики встановили на середньому рівні корпусу.

Для роторних машин добре розроблені методи аналізу вібраційних процесів (спектральний, кореляційний, кепстральний, пік-факторний та ін.). Ці методи придатні також для прокатних станів в стаціонарному режимі обертання. Однак аналіз публікацій показує, що подібні методи на прокатних станах практично не застосовуються. Це відбувається, мабуть, через відсутність на станах необхідності в подібних регулярних вимірюваннях (а також систем вібродіагностики). У той же час представляє значний інтерес яким чином і в якому напрямку по лінії приводу поширюються вібраційні сигнали від неполадки, наприклад, підшипника шестеренної кліті або зубів колеса редуктора. Труднощі у визначенні джерел посиленої вібрації створюються, коли мають місце або починають розвиватися неполадки одночасно в 2-3-х деталях (вузлах). Подібні питання для прокатних станів необхідно вирішувати, щоб створити високоефективну систему діагностування.

Режим роботи кожної кліті носить періодичний характер, що повторюється, та включає; а) захоплення смуги валками; б) усталений процес прокатки на постійній швидкості; в) викид смуги з валків; г) холостий хід. Розглянемо більш до-

кладно перші два режими. Особливість процесу захоплення смуги валками полягає в його ударному характері навантаження, в результаті чого у всьому обладнанні кліті і лінії приводу формуються затухаючі коливальні процеси. Тривалість перехідних процесів вельми незначна (до 0,8...1,0 с), проте вони володіють істотною інформативністю. Це обумовлено не тільки швидким навантаженням, але і дією ряду супутніх збурювальних факторів пов'язаних, перш за все, з зносом обладнання (табл. 2.1).

Так, в крутильній системі головного приводу коефіцієнт динамічності K досягає значень 3,5...5 при розвиненому зносі бронзових вкладишів універсальних шпинделів і 1,8...2,5 при нових вкладишах. Подібні систематичні перевантаження, незважаючи на короточасну дію, негативно позначаються на ресурсі облад-

Таблиця 2.1 – Збурювальні фактори, що впливають на вібродинамічні процеси в двох режимах роботи прокатної кліті

Режим захоплення смуги валками		Сталий режим	
1	Знос (зазори) в зчленуванні «шпиндель-робочий валок»	1	Поломка і знос зубчастих зачеплень
2	Знос (зазори) в зубчастому зачепленні шестеренної кліті і редуктора.	2	Поломка і знос в підшипникових опорах валів шестеренної кліті і редуктора
3	Знос підшипникових опор.	3	Поломки підшипників робочих і опорних валків.
4	Зазор між опорами валків і станиною.	4	Ексцентриситет бочки валків.
5	Ослаблення кріпильних болтів шестеренної кліті і редуктора.	5	Биття шпинделів.
6	Взаємодія клітей через смугу	6	Різновшчинність смуги.
	Тривалість коливань до 0,8...1,0 с		Тривалість коливань 10...30 с і більше

нання. Тому одне з важливих завдань полягає у визначенні поточного ТС – зносу та зазорів шпindelного зчленування. В даний час вони безпосередньо під час роботи стану не вимірюються. Заміну шпинделів роблять за результатами замірів зносу бронзових вкладишів під час зупинки стану в зв'язку з перевалкою робочих валків або відповідно до планових ремонтних термінів, обумовлених на основі досвіду експлуатації. Частота і амплітуда коливань обладнання в перехідний період залежать також від зносу зубчастих зачеплень шестеренної кліті, редуктора, муфт, від зазорів в підшипникових опорах та між подушками валків і станиною кліті.

На підставі аналізу дослідно-промислових і експериментальних вимірювань на БШШС та математичного моделювання встановлено ряд особливостей перехідних процесів.

1. Чим більше знос і кутовий зазор в шпindelному зчленуванні, тим більше максимальне динамічне навантаження та коефіцієнт динамічності в лінії приводу.

2. В процесі експлуатації клітей вигляд коливань моменту на валу між двигуном і редуктором істотно змінюється від типового затухаючого осцилятора до появи зворотних ударів після одного-двох піків коливань (рис. 2.11, рис. 2.12) при зменшенні їх частоти.

3. Спостерігається взаємозв'язок моменту і вібрації корпусного обладнання уздовж лінії приводу (рис. 2.9). Він полягає в тому, що при хорошому (початковому) стані обладнання нижча частота крутильних коливань чітко проявляється в вібрації, а при збільшенні зносу, наприклад, підшипникових опор редуктора, накладається високочастотна складова.

4. Відбувається запізнювання реакції ділянок лінії приводу на ударну дію навантаження до валків тим більше, чим більше знос в зчленуваннях (рис. 2.10) [21, 52-57].

5. Зі збільшенням зносу опорних подушок валків збільшуються удари між подушкою і станиною.

У роботах [21, 73] показано яким чином параметри перехідних процесів, обумовлені захопленням смуги валками, використовуються в діагностичних цілях.

Сталий режим прокатки триває 10...30 с і більше в залежності від типу стану. На відміну від режиму захоплення тут діють інші збурення з боку обладнання (табл. 2.1). Характер їх вібраційної прояви багато в чому ідентичний тим, які вивчені для роторних машин. Наприклад, наведений на рис. 2.15 вигляд істотного ударного вібраційного процесу в т. 1 редуктора, де був дефект в підшипнику [21], близький до відомих прикладів з публікацій [81]. Тому для режимів роботи з навантаженням і без навантаження (холостий хід) прийняті відомі та випробувані способи і методи діагностування при постійній частоті обертання механізму.

Кліті ШШС по конструктивному рішенню ідентичні та відрізняються величиною передавального відношення редуктора. Частота обертання валків від кліті до кліті збільшується. Особливість технологічного режиму полягає в тому, що захоплення смуги валками здійснюється на швидкості холостого ходу при невели-

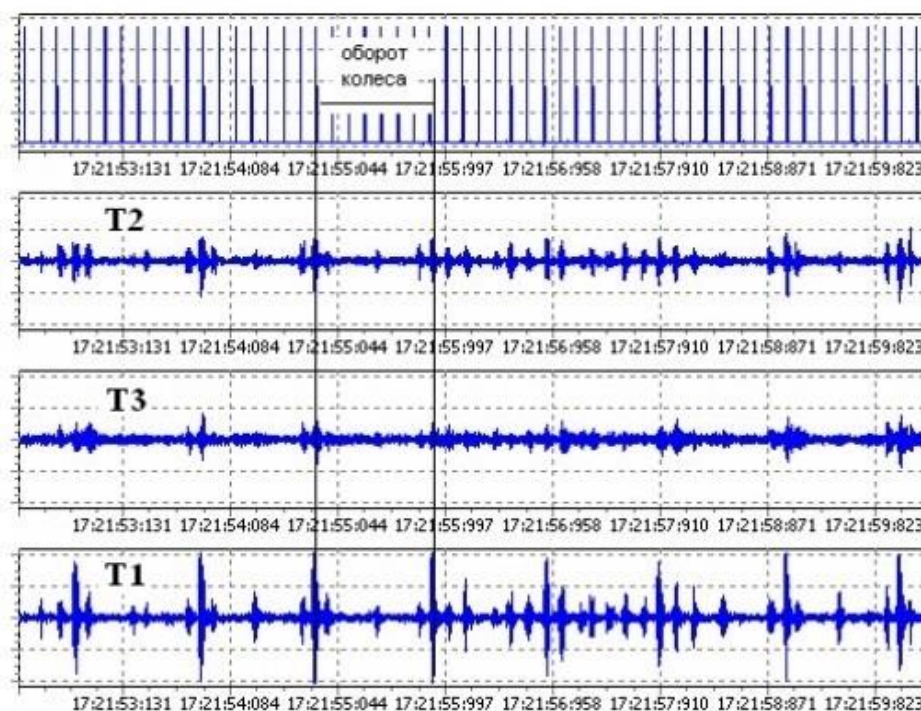


Рисунок 2.15 – Характер вібрацій в точках 1, 2 і 3 під час холостого ходу при наявності дефекту в т.1 (рис. 2.10)

кому (0,5%) падінні її після навантаження лінії приводу. Суттєве значення для прокатних станів має те, що шляхом порівняння вібраційних процесів в ідентичних точках обладнання однієї кліти, а також між клітками в режимах роботи під навантаженням і без навантаження підвищується достовірність діагностичних висновків.

У результаті представлених матеріалів приходимо на перший погляд до тривіального висновку - вібраційні процеси в ідентичних точках обладнання різних клітей в перехідному і усталеному режимах істотно відрізняються. Однак, разом з цим суттєво відрізняються і збурюючі фактори, останні, в свою чергу, тісно пов'язані з ТС обладнання. Розглянуті режими в інформативному відношенні (в частині вібрації) доповнюють та збагачують один одного. Наприклад, в режимі б) завдання визначення зазору в шпиндельному зчленуванні не вирішується, проте вирішується в режимі а); не вирішується в режимі а) завдання визначення поломки зуба в зачепленнях, але вирішується в режимах б) і г).

Діагностичною інформацією володіють також режими викиду смуги з валків і не відмічені в таблиці: розгін та гальмування стану, прокатка зварних з'єднань, взаємодія суміжних клітей через смугу що прокочується, коли в першій кліті настає сталий режим прокатки, а в наступній відбувається захоплення смуги валками. Облік цих режимів істотно наповнює вібраційну інформацію про стан устаткування і технології прокатки та підвищує ефективність застосування систем діагностики.

Логічні міркування, здоровий глузд та результати математичного моделювання дозволяють встановити наступні особливості прояву і дії зносу і кутових зазорів в лінії приводу.

1. Знос та кутові зазори $\delta_{ш}$ на шпиндельній ділянці призводять до збільшення динаміки (коефіцієнта динамічності) як по цій ділянці, так і на ділянці редуктор – двигун.

2. Знос на моторній ділянці (зазор δ_m) впливає тільки на динаміку цієї ділянки.

3. Наявність зносу на обох ділянках одноразово ($\delta_{ш}$ і $\delta_{м}$) призводить до посилення їх впливу на моторну ділянку.

Щоб одержати кількісні і якісні уявлення про вказані залежності виконали математичне моделювання перехідних процесів при захопленні смуги. Лінію приводу згідно [61, 73] прийняли у вигляді трьохмасової системи при умові дії постійного збуджуючого моменту на валках.

На рис. 2.16 точками «ш» та «м» позначено значення коефіцієнту динамічності відповідно на шпindelьній $K_{ш}$ і моторній $K_{м}$ ділянках при відсутності зносу і зазорів, тобто коли лінія приводу в цьому відношенні знаходиться в найкращому стані. Як бачимо рис. 2.16 в, відповідає найгіршому поєднанню зносу та зазорів на обох ділянках. Якщо у варіанті а $K_{м \max} = 2,8$, то у варіанті в $K_{м \max} = 3,3$; при цьому $K_{ш \max} = 2,2$. В інших клітках кількісні показники цих параметрів мають друге значення, але якісна поведінка залишається незмінною.

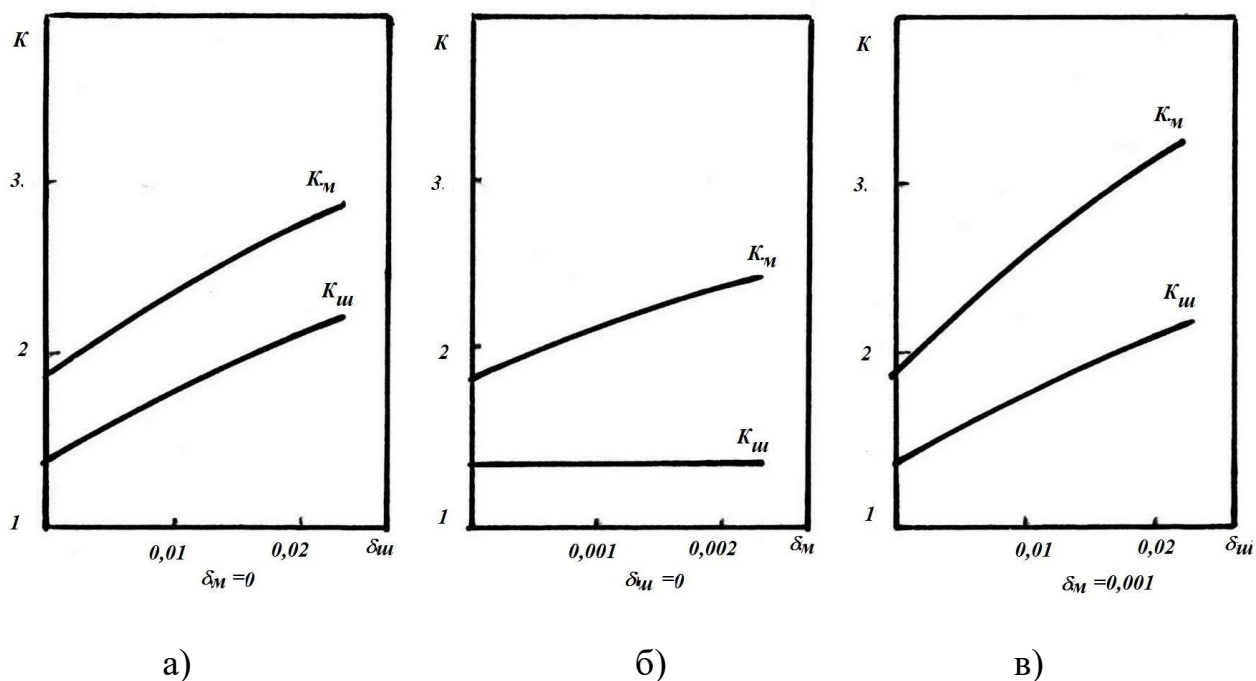


Рисунок 2.16 – Залежність коефіцієнту динамічності на шпindelьній $K_{ш}$ і моторній $K_{м}$ ділянках від поєднання значення зазору на цих ділянках

Розглянемо особливості та закономірності зміни ТС спільно з ударними навантаженнями в процесі тривалого періоду експлуатації клітей з урахуванням термінів фактичних ремонтних впливів. Це дозволяє визначити періоди, коли результати вібровимірювань в перехідних режимах захоплення смуги валками приносять найбільшу діагностичну ефективність.

Перша особливість полягає в різних періодах обслуговування двох основних ділянок - шпindelної та моторної (редуктор - двигун). Заміну шпинделів по зносу бронзових вкладишів здійснюють через 15-60 діб в залежності від типу та умов роботи клітей і стану. Планове технічне обслуговування редукторів здійснюється раз на рік під час капітального ремонту. Тому в процесі експлуатації утворюються різні поєднання ТС зазначених двох ділянок, з яких виділимо основні (рис. 2.17) [82, 83].

З агрегатного журналу зробили виписки підряд за 2,5 роки термінів технічного обслуговування декількох клітей з заміною обладнання та замірів зносу брон-

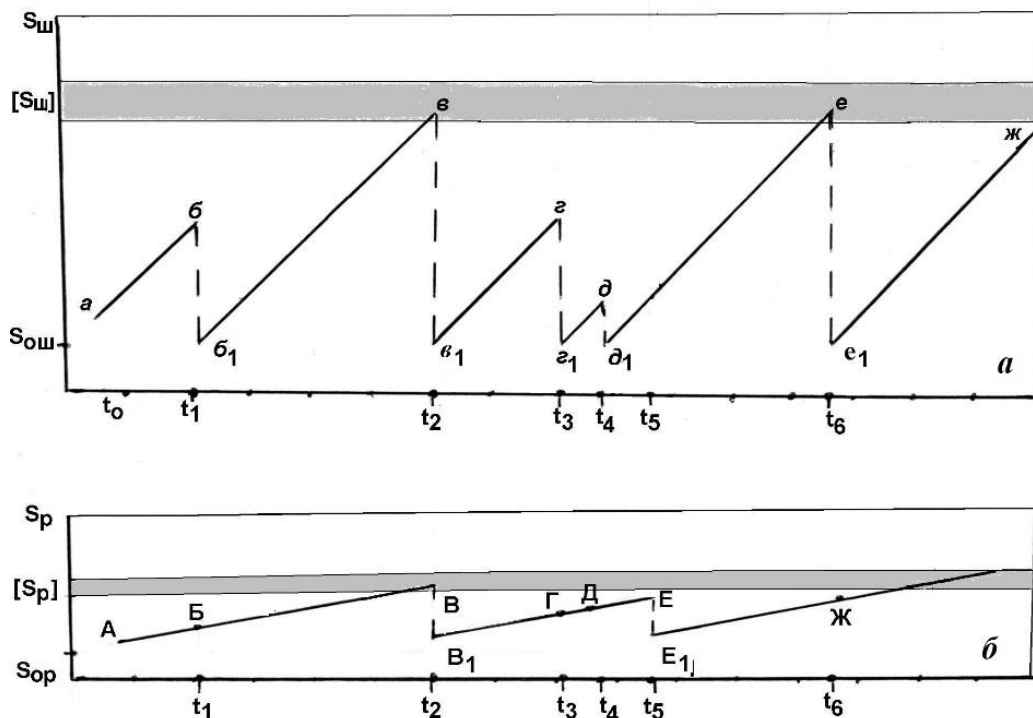


Рисунок 2.17 – Розвиток зносу на шпindelному (а) і моторному (б) ділянках в процесі тривалої експлуатації кліті № 3 з урахуванням термінів технічного обслуговування головної лінії.

зових вкладишів шпинделів. Літературні дані [23, 24, 85] свідчать про те, що знос вкладишів в часі носить рівномірний характер; є дані про швидкість зносу. Тому в багатьох випадках є можливість вирахувати значення зносу (зазору) за певний період роботи.

На рис. 2.17 наведено як і наскільки змінюється знос на двох ділянках під час тривалої роботи. На рис. 2.18 подано характер зміни коефіцієнтів динамічності $K_{ш}$ та K_M відповідно тих же періодів, який одержали шляхом математичного моделювання.

Відповідно до рис. 2.17 допустиме значення (згідно технологічної інструкції) бронзових вкладишів складає $[S_{ш}] = 5-6$ мм; $[S_p] = 1$ мм – теж саме для зубчастих зачеплень ділянки редуктор - двигун, S_0 – відповідає початковому зазору. Точки t_i на рис. 2.17 та рис. 2.18 співпадають.

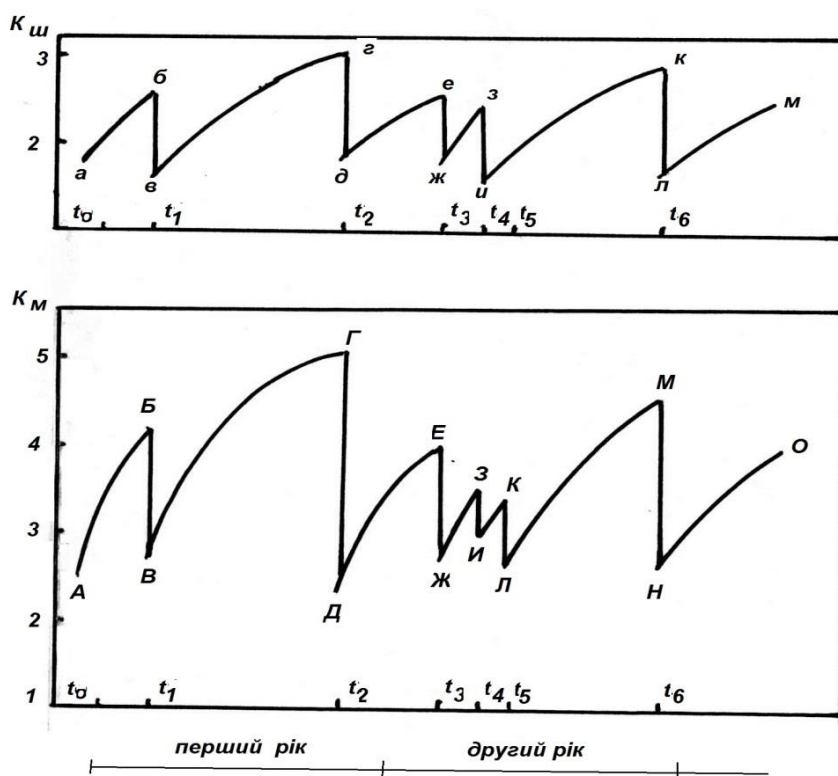


Рисунок 2.18 – Залежність коефіцієнта динамічності на моторній K_M

та шпиндельній $K_{ш}$ ділянках під час експлуатації кліті № 3 стану з урахуванням термінів технічного обслуговування шпинделів (з заміною бронзових вкладишів) і редуктора (заміна зубчастих передач)

Можливі наступні крайні сполучення ТС ділянок.

1. Нормальний (відносно найкращий) стан обох ділянок в початковий період після капітального ремонту шестеренних клітей, редуктора, муфт, установки шпинделів з новими бронзовими вкладишами.

2. Максимальний знос бронзових вкладишів в шпинделях (перед заміною) при нормальному стані ділянки редуктор - двигун.

3. Максимальний знос зубчастих зачеплень редуктора і муфт при установці шпинделів з новими вкладишами (нормальний стан шпиндельної ділянки).

4. Найгірший стан обох ділянок лінії приводу одноразово настає безпосередньо перед капітальним ремонтом, коли їх знос найбільший.

Через зношеність та появу зазорів на обох ділянках їх динаміка в часі носить періодичний пило-стрибкоподібний вигляд. Він обумовлений ТС ділянок. Спочатку відбувається поступове збільшення коефіцієнта динамічності, а після заміни шпинделів зі зношеними вкладишами значення K різко зменшуються.

Розглянемо спільно графіки на рис. 2.17 та рис. 2.18 з урахуванням даних табл. 2.1. Після установки в момент t_1 шпинделів з новими вкладишами ТС шпиндельної ділянки відновився (т. «б₁», рис. 2.17, а), динаміка обох ділянок зменшилася (т. «В» і «в», рис. 2.18). Однак ТС моторної ділянки продовжувало погіршуватися (лінія А-Б-В, рис. 2.17, б). До моменту t_2 заміни шпинделів їх напруження складало 8 місяців. Динаміка зростала по лініях «В-Г» і «в-г», а знос - по «б₁-в» і «Б-В». Одночасно в момент t_2 замінили вхідний вал і блок коліс. Тому відбулося істотне зменшення не тільки $K_{ш}$, а й $K_{м}$.

Момент t_2 цікавий тим, що перед ремонтом, тобто при t_2^- , стан обох ділянок був найгіршим (варіант 4), а після ремонту (t_2^+) найкращим (варіант 1). Подібному випадку відповідає також момент часу t_6^+ . Тому вимірювання крутного моменту і вібрації безпосередньо перед капітальним ремонтом та відразу після нього дозволяють отримати зразки «найгірших» і «найкращих» сигналів, пов'язаних з ТС обладнання, а їх порівняння між собою зробити правильні діагностичні висновки. Це дуже важливий момент, оскільки знання кількісної відмінності па-

раметрів вібрації або інших інформативних ознак (наприклад, часу запізнювання реакції ділянок лінії приводу, періоду між першими піками коливань, рівня зворотних ударів та ін.) навколо t_i -х точок дозволяє підвищити точність та достовірність діагностичних висновків. Накопичення бази даних вимірювань та визначених за ними ознаками в точках t_i^- і t_i^+ спільно з вмістом ремонтних впливів, зазначених в агрегатних журналах, сприяє більш глибокому розумінню взаємозв'язків технології, обладнання, режимів роботи та процесу діагностування ТС обладнання прокатних станів.

Очевидно, що вимірювання навколо інших точок t_i^- і t_i^+ , зазначених на рис. 2.17 і рис. 2.18, також забезпечують досить високу інформативність, незважаючи на те, що їм відповідають проміжні поєднання стану ділянок.

У зв'язку з викладеним пропонується вести побудову поточних кусковолінійних залежностей згідно рис. 2.17, екстраполювати їх під час міжремонтного періоду та призначати дату вимірювань з урахуванням зазначених сполучень ТС ділянок. При такому підході до процедури організації вимірювань параметрів перехідних процесів вдається максимально використовувати вельми інформативний режим захоплення смуги для визначення зносу та кутових зазорів в з'єднаннях крутильної системи лінії приводу валків.

При використанні системи діагностики на прокатних станах в режимі стаціонарного обертання можуть застосовуватися відомі методи та способи визначення ТС для роторних машин [81, 85, 86]. В цьому випадку розпізнається інший вид зносу та несправності, зокрема, підшипників і зубчастих зачеплень: дефекти тіл кочення і сепаратора, зачеплення, муфт, дефекти мастила, не співвісність та ін. У перехідних режимах ці дефекти не встигають себе проявити. У свою чергу в стаціонарному режимі не проявляються знос і зазори в зчленуваннях лінії приводу, оскільки вона знаходиться в напруженому стані. Особливі вимоги до умов роботи кліті тут не пред'являються, вони подібні для роторних машин: при різних частотах обертання, навантаженнях, холостому чи робочому режимі та ін.

Таким чином, в перехідному та стаціонарному режимах роботи прокатної кліті за допомогою системи діагностики вирішуються різні завдання. У цих режимах по-різному відгукуються вимірювані сигнали на збурення як це помітно на рис. 2.10. У холостому режимі перед захопленням смуги вібрація була відсутня, при захопленні смуги спостерігається реакція моменту та вібрації ударного виду. Тобто під навантаженням вібрація збільшилася.

Таким чином, при розробці систем діагностування клітей прокатних станів необхідно враховувати високу інформативність перехідних процесів в режимах захоплення смуги валками, параметри яких тісно пов'язані зі зношеністю та кутовими зазорами в зчленуваннях лінії приводу. Діагностичні вимірювання вібросигналів в такому режимі найбільш ефективні в періоди поєднань найгіршого та найкращого стану шпіндельного і моторного ділянок, перш за все, перед та після ремонтів.

У стаціонарному режимі роботи кліті (холостий або робочий) можуть бути застосовані відомі методи та способи діагностування для роторних машин. Використання в діагностичних цілях перехідного та стаціонарного режимів роботи обладнання сприяє суттєвому розширенню і поглибленню діагностування прокатних клітей та підвищенню його ефективності.

2.3 Загальні принципи побудови вібродіагностичної системи багатоклітьового стану

Викладені вище результати дозволяють визначити загальні принципи, які слід враховувати в системах діагностики багатоклітьового стану та роботи з ними. При цьому мається на увазі, що вимірювальна інформація від 97 вібродатчиків, розташованих в обладнанні клітей на протязі близько 300 м, надходить в єдиний обробний центр (система «КОРУНД») та обробляється відповідно до певних правил. Потім в заданому вигляді (цифри, графіки та ін.) надходить кільком клієнтам для оцінки обстановки.

1. У системі використовуються дані вимірів не тільки в сталому режимі прокатки, а й під час холостого ходу (без навантаження), при захопленні металу валками і викиді заднього ділянки з валків, при розгоні і гальмуванні стану, згідно з технологією.

2. Проводяться періодичні вимірювання параметрів в найбільш інформативні періоди роботи клітей і стану (безпосередньо перед і після ремонту). Дані операції проводяться цілеспрямовано для збору та зберігання зразків «найгірших» і «найкращих» сигналів та їх значень.

3. Вимірювання з цілеспрямованою зміною параметрів прокатки або режимів роботи стану (окремих клітей) для реалізації нестандартних способів діагностування (наприклад, швидкістю підходу сляба до кліті ДУО).

4. З огляду на конструктивну та технологічну спільність багатоклітьового стану необхідно розробити алгоритм для порівняння показників вібрації (розмах, спектр і ін.) в однотипних точках обладнання 2 - 3-х суміжних клітей. Наприклад, підшипники шестеренних клітей і редукторів. Періодичний порівняльний аналіз показників дозволяє швидше виявити початок деградаційних процесів в найбільш відповідальних вузлах.

2.4 Висновки

1. Вперше виконано системний аналіз даних вимірювань вібродинамічних процесів в парціальних ділянках (системах) ліній головного приводу валків і робочої кліті БШШС. Виділення таких систем дозволило глибше розглянути їх діагностичні властивості та зв'язок з параметрами прокатки і станом обладнання. Встановлено закономірну єдність перехідних процесів, що формуються, одночасно в декількох вузлах, обумовлене захопленням смуги валками.

2. Вперше обґрунтовані та запропоновані періоди цілеспрямованих вимірювань вібраційних параметрів, коли отримана інформація практично однозначно відповідає двом крайнім ТС обладнання – найкращому (після ремонту) і найгір-

шому (перед ремонтом). Отримувані в такі періоди параметри можуть служити в якості еталонів (крайніх значень) для порівняння з поточними значеннями та суттєво підвищити достовірність діагнозу.

3. Запропоновано кілька принципів застосування та побудови вібродіагностичної системи багатоклітьового стану.

Результати, викладені в розділі, опубліковані в роботах [65, 74, 77, 82, 83].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВІ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ, ЇХ ОБРОБКА, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ

3.1 Методика і засоби проведення вимірювань

На стані 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» вимірювання вібродинамічних процесів виконувались співробітниками ІЧМ НАНУ [21, 60, 87]. При цьому основна увага була приділена переважно короткочасовим перехідним процесам при захопленні смуги валками. Вирішувалося завдання використання їх параметрів і особливостей для розробки способів діагностування зносу та кутових зазорів в з'єднаннях лінії головного приводу валків.

Вимірам під час усталеного режиму прокатки приділялося значно менше уваги. Використовувалися тільки окремі точки обладнання в деяких клітках. В результаті залишилися не дослідженими загальна картина вібраційних полів обладнання від кліті до електродвигуна, закономірності їх зміни в залежності від ТС (зносу, дефектів що розвиваються) і по клітям стану з урахуванням технологій та параметрів прокатки. Для більшості редукторів роторного обладнання, наприклад, турбіни, вібраційна картина з урахуванням дефектів (поломка зуба, неполадки в підшипниках, неспіввісність та ін.) досліджена досить повно, розроблені правила розпізнавання ТС. Устаткування прокатних станів вельми специфічне (великі маси і моменти інерції, діаметри, швидкості, температури та ін.) з їх режимами роботи. І все ж слід очікувати, що тут також на підставі вимірів можливо і слід встановити цілком певні залежності для вібраційних полів.

Слід зазначити ще один момент, який полягає в тому, що перехід з одного в інший режим роботи - холостий хід (без навантаження), захоплення смуги валками з істотною динамікою, прокатка (під навантаженням), викид смуги з валків і знову холостий хід, слід розглядати в єдності. Наприклад, в високошвидкісній кліті знос та зазори в шпіндельному зчленуванні проявляються у вигляді вібрації

у всіх режимах. Результати досліджень на основі такого підходу дозволяють істотно збагатити та поглибити функції розроблюваної системи вібродіагностики.

Для вимірювання параметрів вібрації використовували п'єзоелектричні акселерометри, що перетворюють механічні коливання в електричний сигнал, пропорційний віброприскоренню. Застосували акселерометр АС-104-3С з виходом по напрузі (ICP) з коаксіальним антивібраційним кабелем, стійким до електромагнітних та вібраційних наведень. Датчик надійний в експлуатації та має добру амплітудно-частотну характеристику:

Частотний діапазон	2-10000 Гц
Діапазон вимірювань	500 м/с ²
Температурний діапазон від	від -50 до +120°C

Датчик розміром 22×20×26 мм кріпиться гвинтом М6 наскрізь до монтажного кубу або монтажного майданчика. Цим забезпечується його оперативний демонтаж при виконанні ремонтних робіт. На одній кліті монтувалось від 7 до 9 датчиків уздовж лінії приводів. Одночасні вимірювання по всім вібродатчикам дозволяли досліджувати взаємозв'язок різних ділянок обладнання в різних режимах роботи кліті на рис. 3.1 зображено розташування датчиків вібрації.

Частота обертання ротора електродвигуна вимірювалася за допомогою штатного тахогенератора. Поточне значення моменту на валу електродвигуна задавалося в систему вібровимірювань зі штатного приладу, в якому момент визначався по електричним параметрам (струм, напруга, обороти). Прокатуваний сортамент (марка стали, кількість смуг в плавці та ін.) фіксувався в системі АСУ «Прокат». В результаті параметри вібрації були прив'язані до номера смуги зі швидкістю та моментом двигуна. У цьому полягав комплексний підхід до дослідно-промислових вимірів. Тривалість вимірювань становила від 2-х до 5 годин посліпль, що дозволило отримувати результати вимірювань при великій кількості прокатаних смуг з різноманітним сорторозміром.

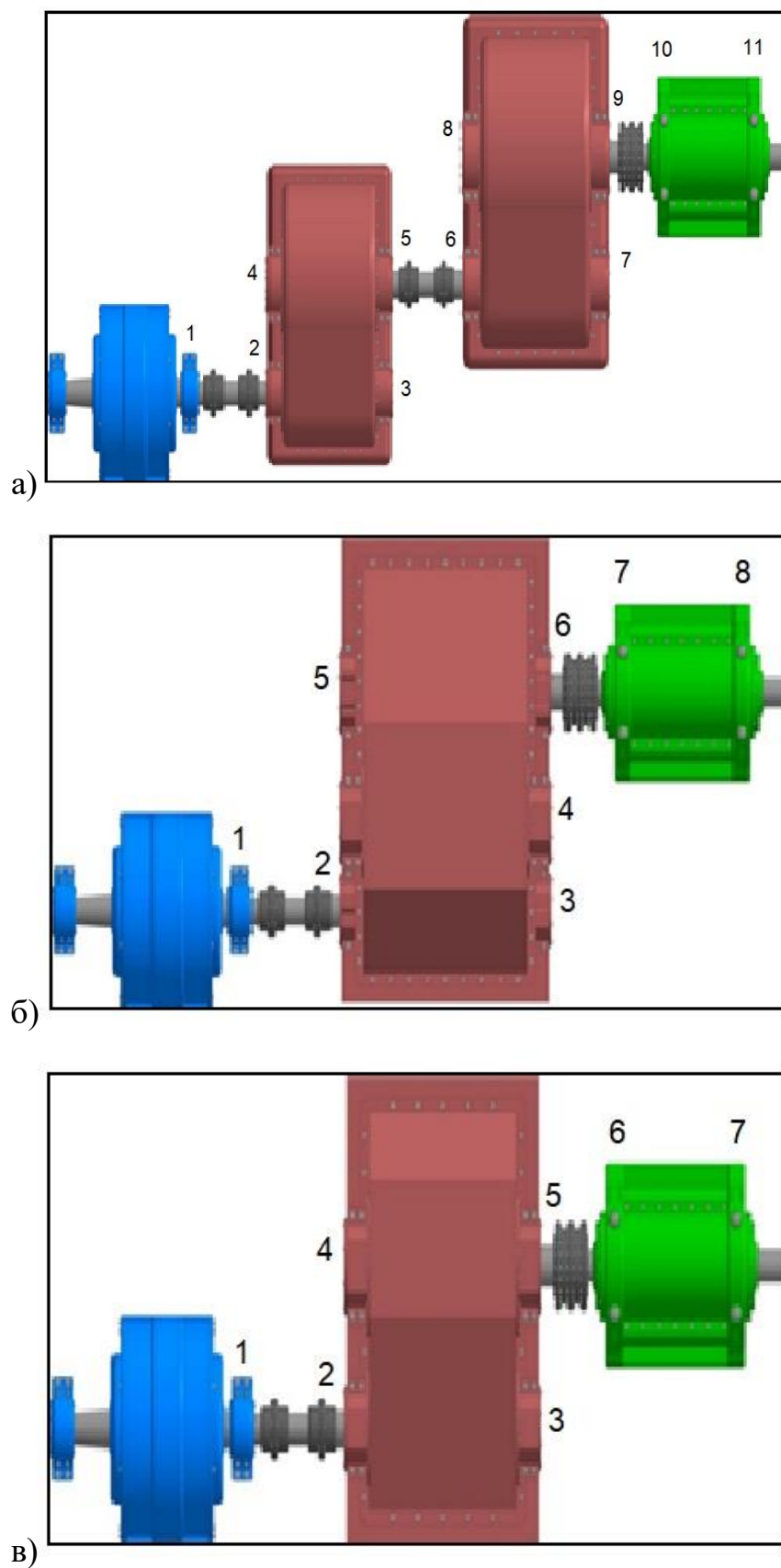


Рисунок 3.1 – Оснащення датчиками вібрації а) кліті ДУО;
 б) клітей № 1 - № 3; в) клітей № 4 - № 10. Стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь»

З урахуванням особливостей технології виконали наступні вимірювання.

1. У парі чорнових клітей ДУО-№ 1, де ведеться роздільна та безперервна прокатка товстої смуги, тобто при різній технології. Ставилося завдання також виконати вимірювання при «найкращому», тобто після ремонту та «найгіршому», перед ремонтом, стані клітей.

2. У парах клітей № 2 - № 3 і № 3 - № 4 виміри виконані також при різних технологіях - роздільна та безперервна прокатка при проміжній товщині смуги з урахуванням стану обладнання (рис. 3.2).

3. У парі перших двох чистових клітей, де прокочуються більш тонкі смуги.

У всіх дослідах отримували загальну картину вібраційних процесів одночасно в 7-9 точках в кожній кліті при холостому ході, захопленні смуги, взаємодії клітей через смугу, прокатці та викиді смуги. Це дозволило виконати аналіз вібрації та розглянути перехідні процеси при захопленні і викиді смуги. Під час виконання роботи була одержана велика кількість записів перехідних процесів. В першу чергу слід зазначити різноманіття виду процесів в одній кліті, оскільки виміри вели при різному на початку не відомому технічному стані обладнання. З'ясувалося, що має значення в яку зміну вели дослідження та під час роботи якої бригади. Кожного разу з агрегатних журналів визначали час, коли в тій чи іншій кліті виконувалось технічне обслуговування (заміна шпинделів, поточний ре-

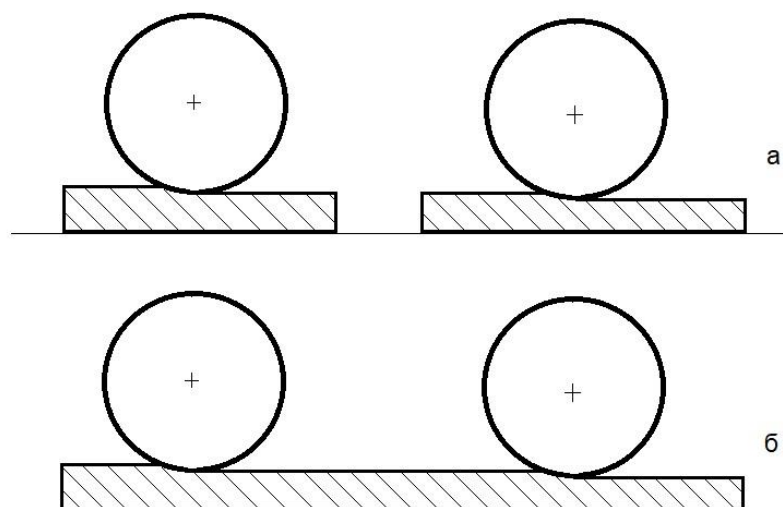


Рисунок 3.2 – Схеми роздільної (одиначної) (а) та безперервної (сляби подвоєної довжини) (б) прокатки в парах клітей ДУО № 1, № 2 - № 3 і № 3 - № 4

монт та ін.). Разом з тим були встановлені типові і схожі між собою в різних клітках перехідні процеси. В більшості випадків їх графіки були виразними, що дозволяло визначити чисельні значення параметрів.

На типовому рис. 3.3 видно початкову реакцію корпусу шестеренної кліті (т. 6, 7) на захоплення смуги. Через $\sim 0,079$ с наступає ударна реакція редуктора з зубцевою частотою (140 Гц) коливань корпусу. Подібні записи дозволяють вирахувати час запізнення реакції ділянок ліній приводу.

Яскраво виражена ударна реакція в інших клітках (ДУО, № 2, № 3) в період захвату смуги та взаємодії клітей через смугу (рис. 3.4, рис. 3.5). Майже в усіх клітках типово відображається реакція корпусу шестеренної кліті.

Відзначимо, що під час захоплення смуги валками розмах вібрації A_3 може в 3...4 рази перевищувати розмах A_x в холостому режимі роботи і в 2...3 рази під час сталого A_c режиму прокатки. Тому відношення типу A_3/A_x , A_3/A_c і A_c/A_x має діагностичні властивості, хоча в деяких випадках (точках) такі відношення не завжди можливо визначити (рис. 3.6, т 1, 3).

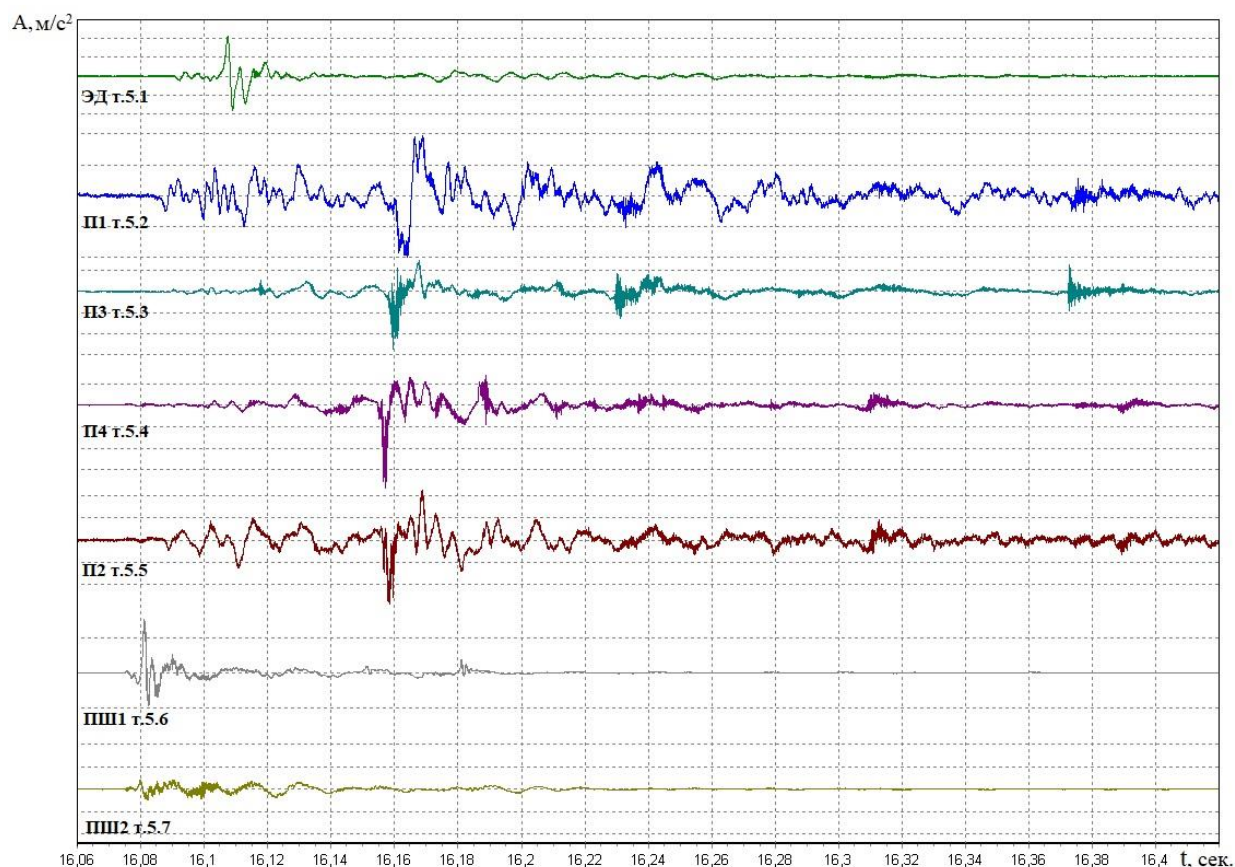


Рисунок 3.3 – Вібрація на опорах в кліті № 5.

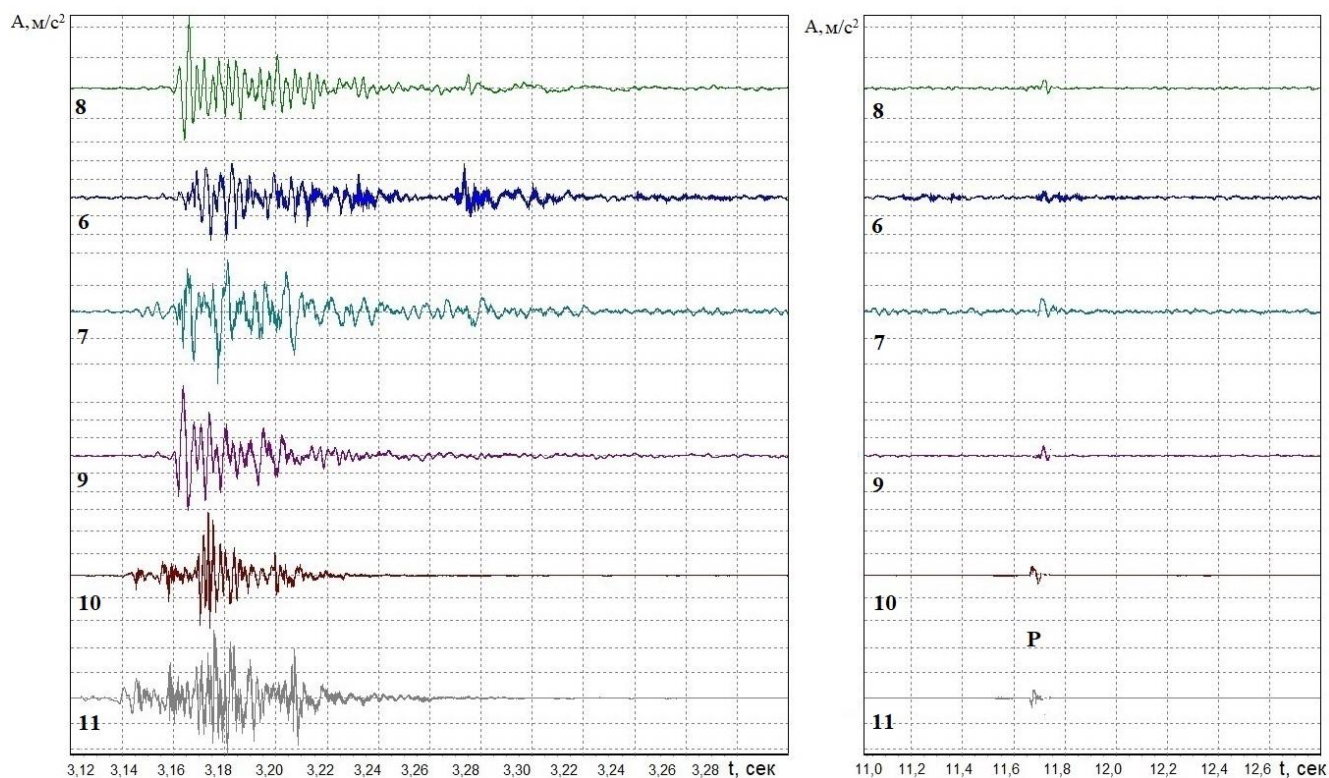


Рисунок 3.4 – Взаємодія клітей ДУО та №1 по вібрації. Вібрація на опорах кліті ДУО при захопленні смуги.

P – реакції лінії кліті ДУО на захоплення смуги в кліті № 1

1-11 – номери датчиків вібрації. Стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь».

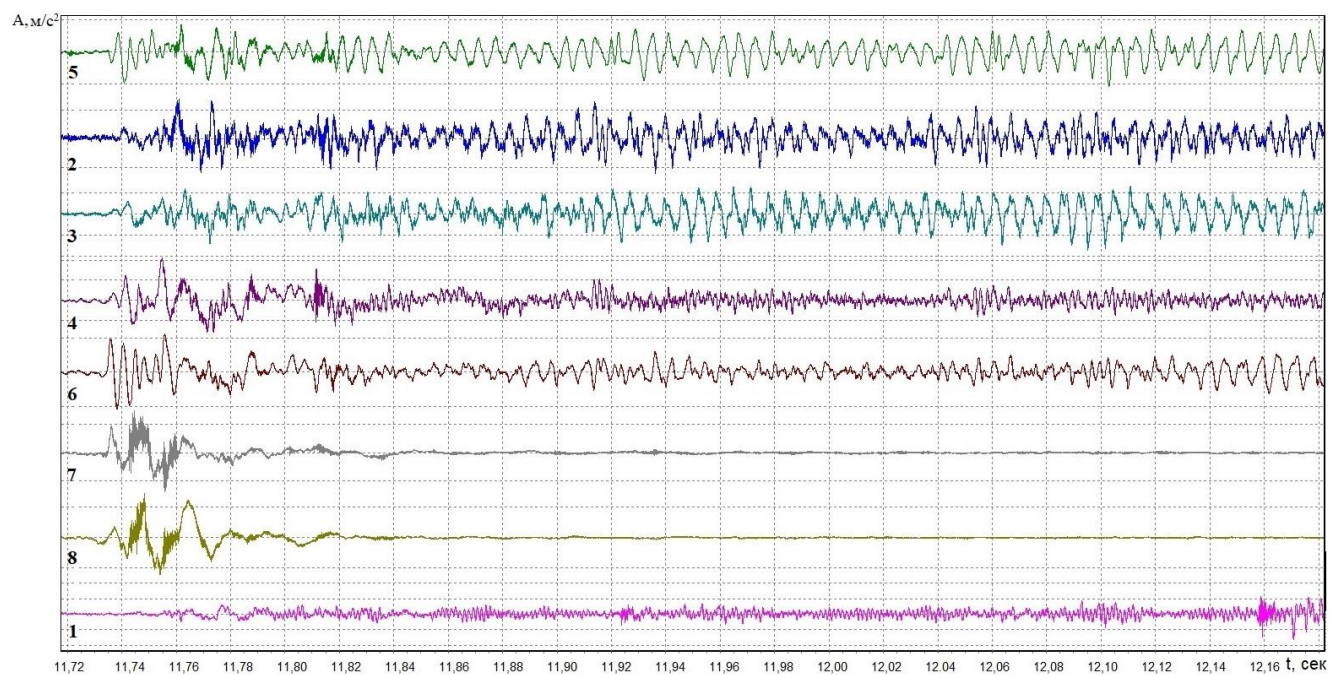


Рисунок 3.5 – Захоплення смуги в кліті № 1

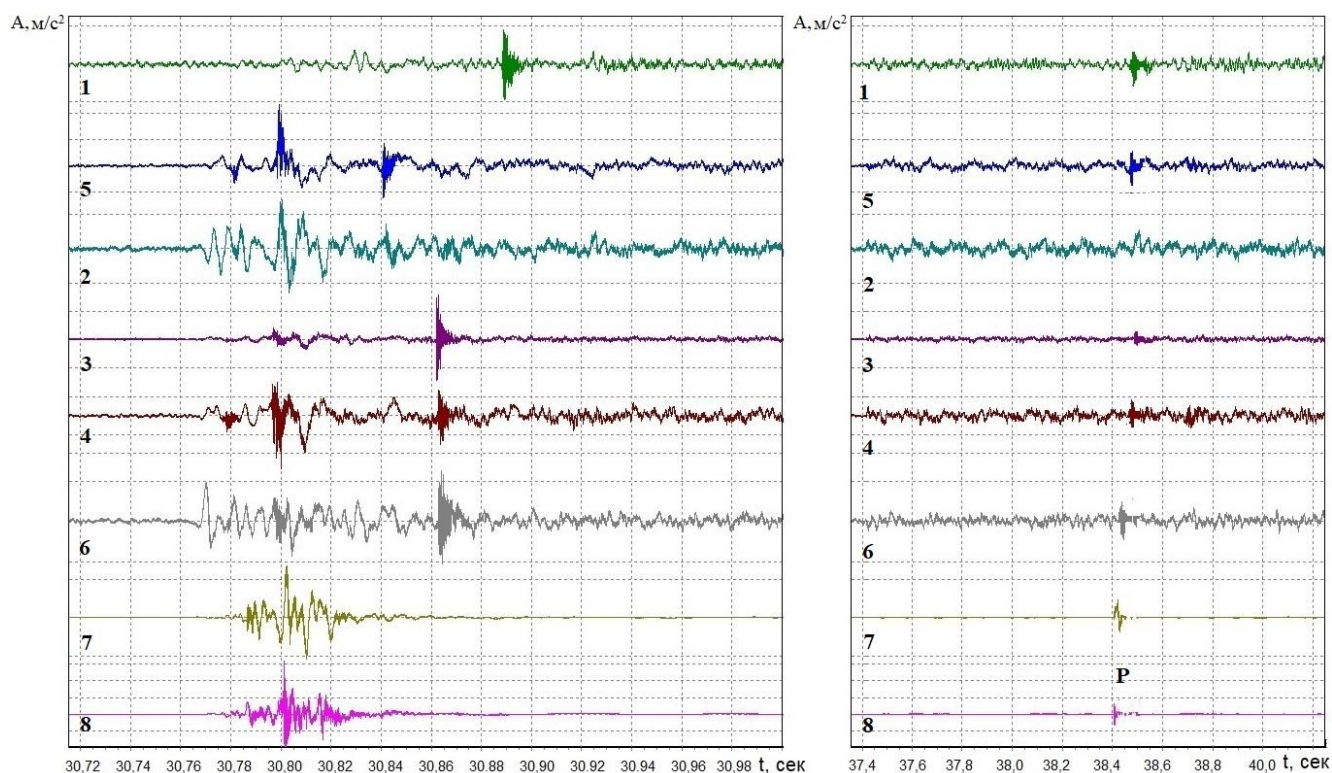


Рисунок 3.6 – Захоплення смуги в кліті № 2. Р – реакція на кліть № 3

На вищезазначених рисунках добре помітна віброреакція (позначка Р) майже в усіх точках на захоплення смуги в наступній кліті. Це вказує на силову взаємодію клітей через смугу.

3.2 Аналіз результатів вимірювань

3.2.1 Чорнова група клітей

При безперервній прокатці в парі клітей ДУО-№ 1 сляб в кліть ДУО задається зі швидкістю в 1,7 рази більшою, ніж при одиночній прокатці. Це призводить до помітних відмінностей перехідного процесу по моменту (рис. 3.7). В найбільшій мірі це проявляється при досить зношеному стані обладнання: розмах віброприскорення збільшується в середньому в 2 рази.

Також добре проявляється взаємодія по вібрації клітей (рис. 3.8). В середньому в 2 рази збільшився час запізнювання реакції ділянок лінії приводу на ударне навантаження в кліті. Встановлено, що розмах вібрації, особливо в точках 9 і

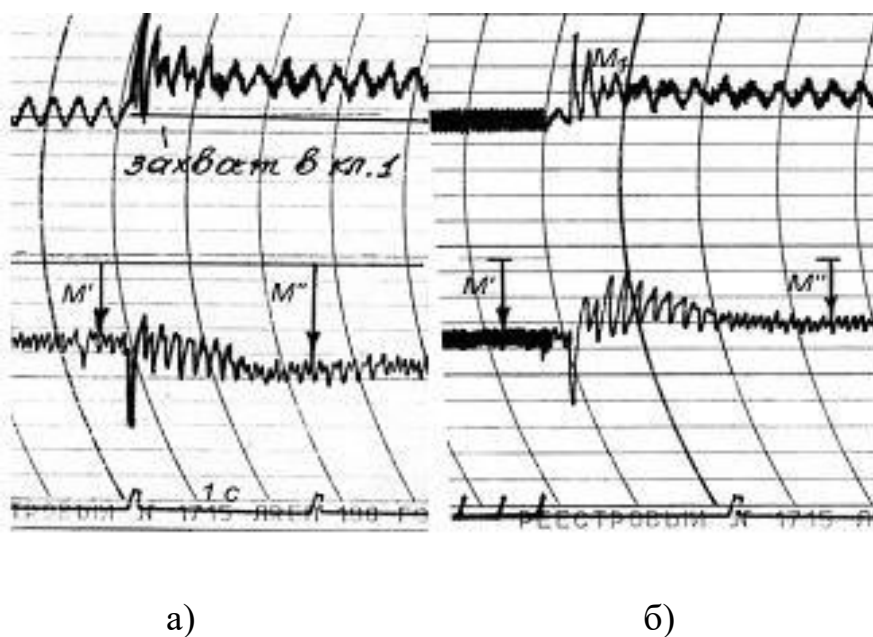


Рисунок 3.7 – Реакція моменту лінії приводу кліті ДУО М на захоплення сляба валками кліті № 1 M_1 : а) підпір; б) натяг

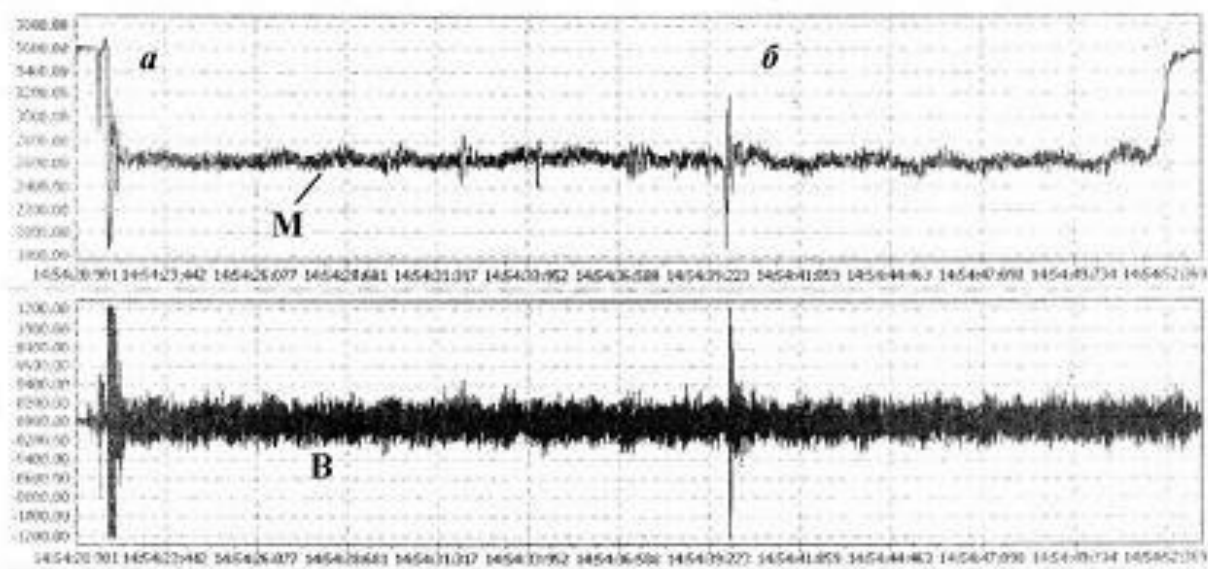


Рисунок 3.8 – Реакція моменту М сил пружності і вібрації В шестеренної кліті ДУО на захват валками кліті № 1

10, при узгодженій швидкості підходу сляба до кліті №1 на 25...35% менше, ніж при неузгодженій швидкості клітей. При меншій швидкості кліті ДУО і, відповідно меншій швидкості підходу смуги до валків кліті № 1, в останній при захопленні витрачається енергія на прискорення металу смуги в осередку деформації, що

веде до ривка натягу і за рахунок цього деякого розвантажені кліті ДУО. При більшій швидкості в смузі відбувається різкий підпір (зусилля стиснення) через короткочасне гальмування смуги в результаті удару товстого сляба об бочку валків кліті № 1. В обох випадках зусилля практично миттєво передається через жорстку товсту смугу валкам кліті ДУО як збурення (віддача), що відбивається на вібрації особливо найближчих точок до робочої кліті.

За даними вимірів, одержаними під час варіації швидкості завдання сляба в кліть № 1, побудували залежність (рис. 3.9). Тут A_p і A_c – максимальні амплітуди вібрації при неузгоджені (р) і узгодженої (с) швидкості. Більш крута права гілка вказує на те, що при завданні слябів з більшою швидкістю ударні навантаження зворотної дії на кліть ДУО збільшуються (разом з розмахом вібрації).

Ці результати отримані при постійному технічному стані шпиндельного вузла. При іншому стані доцільно побудувати подібну дослідну залежність і по ній коригувати швидкість кліті ДУО. З урахуванням цього явища запропонований спосіб корекції швидкісного режиму кліті ДУО за найменшим рівнем вібророзмаху.

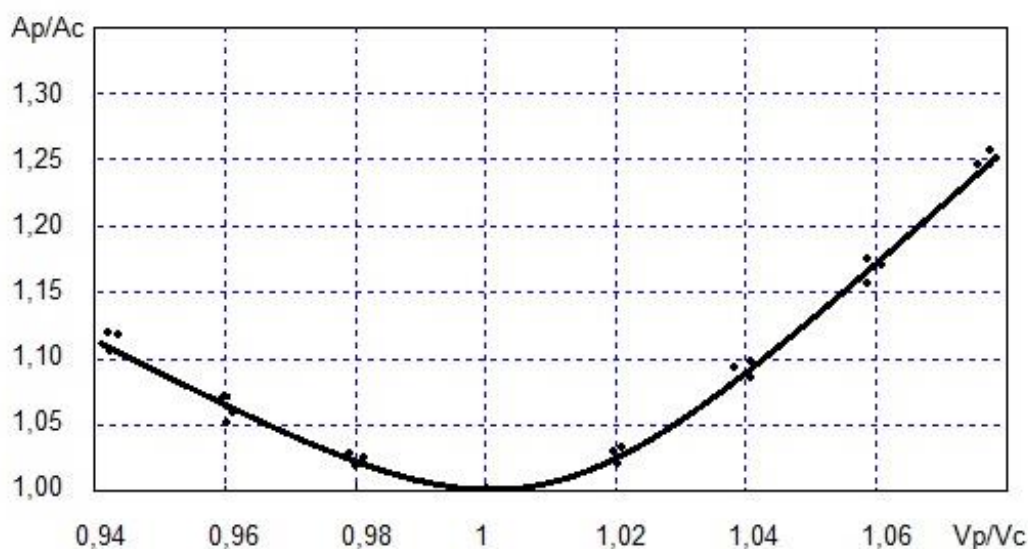


Рисунок 3.9 – Залежність відношення розмаху вібрації A_p/A_c корпусу шестеренної кліті ДУО від відношення швидкості прокатки в клітях ДУО - № 1 V_0/V_1

На (рис. 3.10) видно, що при захопленні смуги валками у всіх точках трьох клітей збуджується істотна вібрація шестеренної кліті та редуктора. Встановлено, що при нормальному ТС (після ремонту) у вібрації досить добре проявляється частота крутильних коливань ліній приводу. При погіршенні ТС обладнання, особливо перед ремонтом, у вібрації з'являється (накладається) додаткова високочастотна складова. Тут також шляхом моніторингу розмаху та частотного складу вібрації, відстеження їх тренду можна дійти, по крайній мірі, до якісних діагностичних висновків. В даних клітях чітко простежується поступове збільшення часу запізнювання реакції по мірі збільшення відстані вібродатчиків від робочої кліті. Тим самим підтверджується діагностична інформативність цього параметра.

Кліті № 2-3 та № 3-4. В роботі [80] показано, що, незважаючи на велику відстань між клітями (19 і 25 м) при безперервній прокатці також спостерігається зворотна реакція по крутному моменту лінії приводу кліті № 2 на захоплення смуги

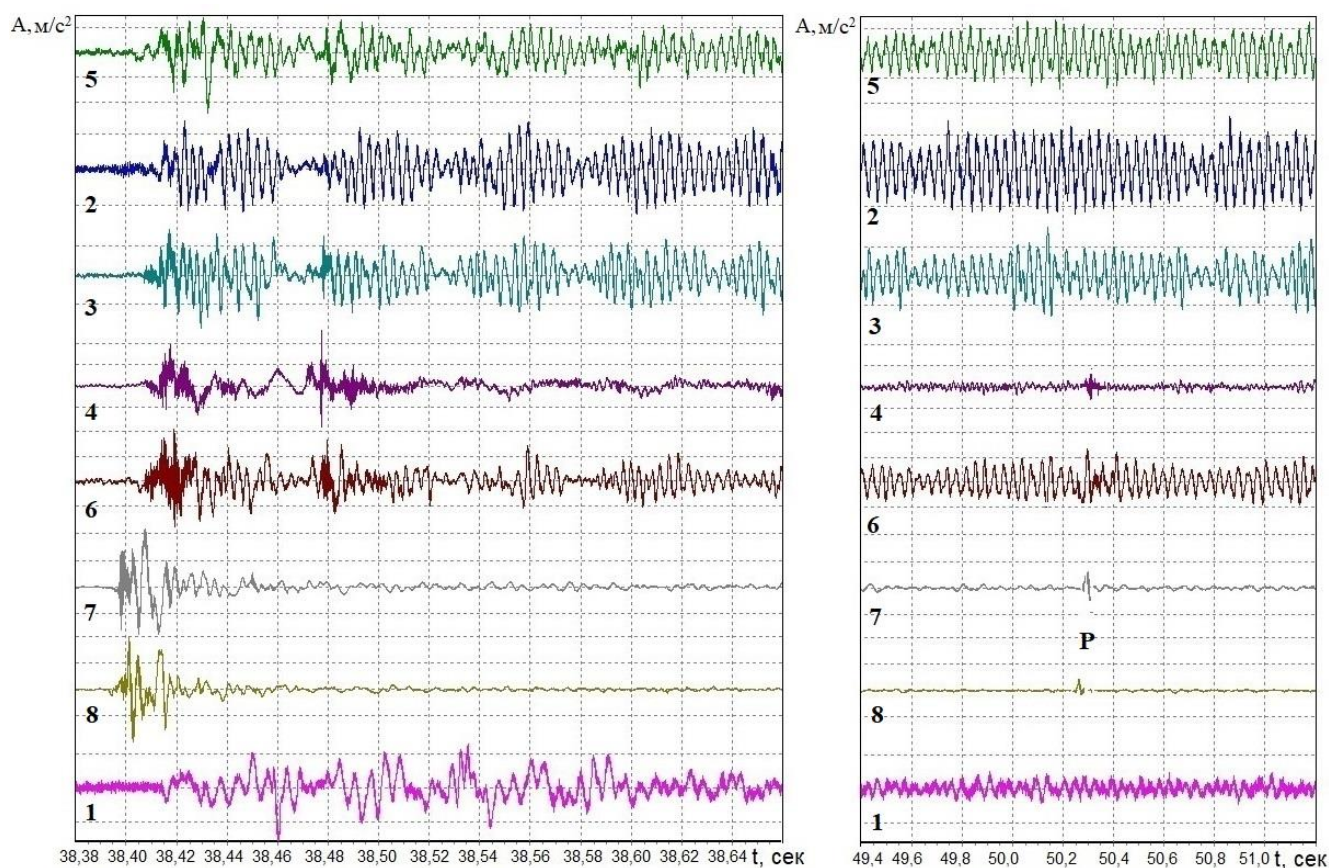


Рисунок 3.10 – Вібрація на опорах кліті № 3 при захопленні смуги та взаємодії з кліттю № 4

ги в кліті № 3 та кліті № 3 на захоплення в кліті № 4. Реакція вібрації в різних точках лінії кліті № 2 і № 3 на захоплення смуги в клітках № 3 і 4 різна (рис. 3.6, рис. 3.10, рис. 3.11), проте в цілому значно слабкіша, ніж при попередньому захопленні.

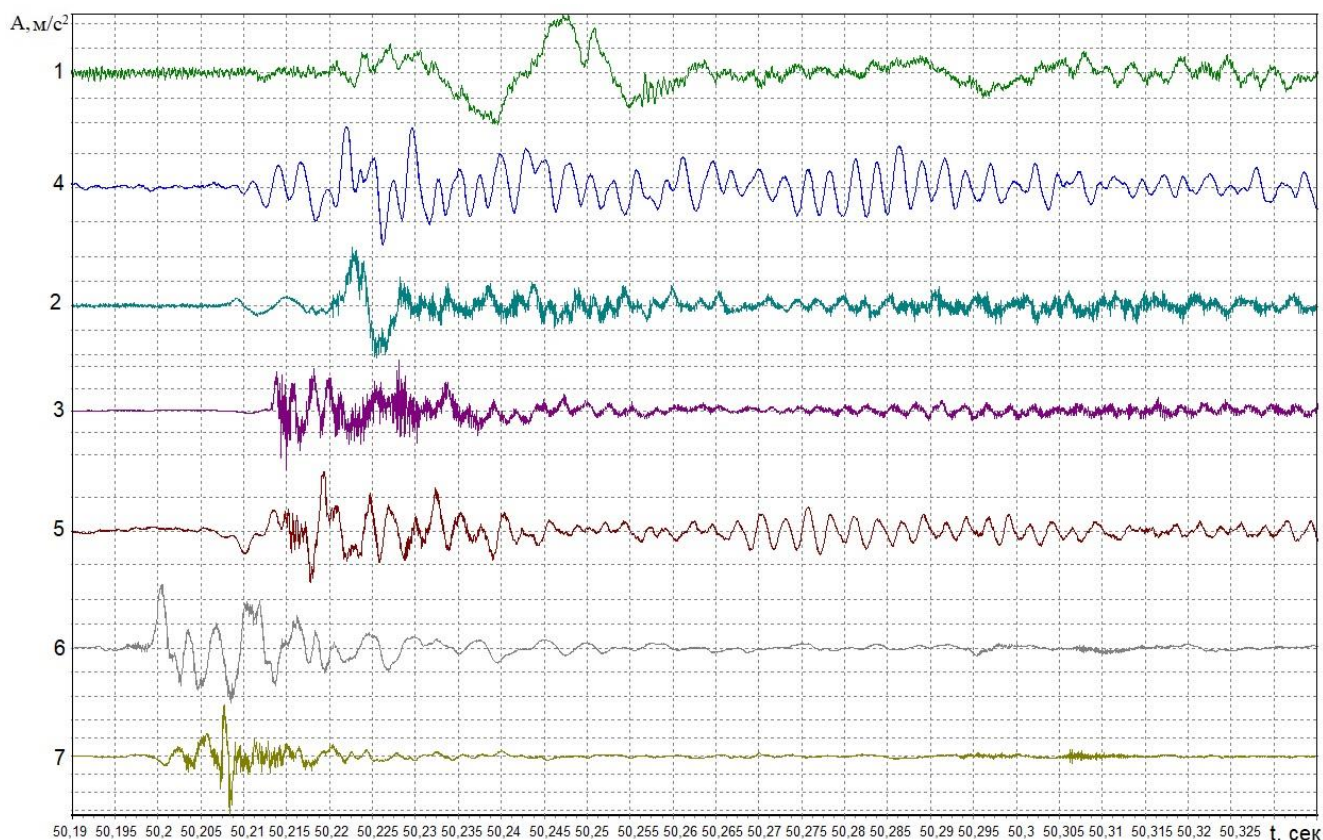
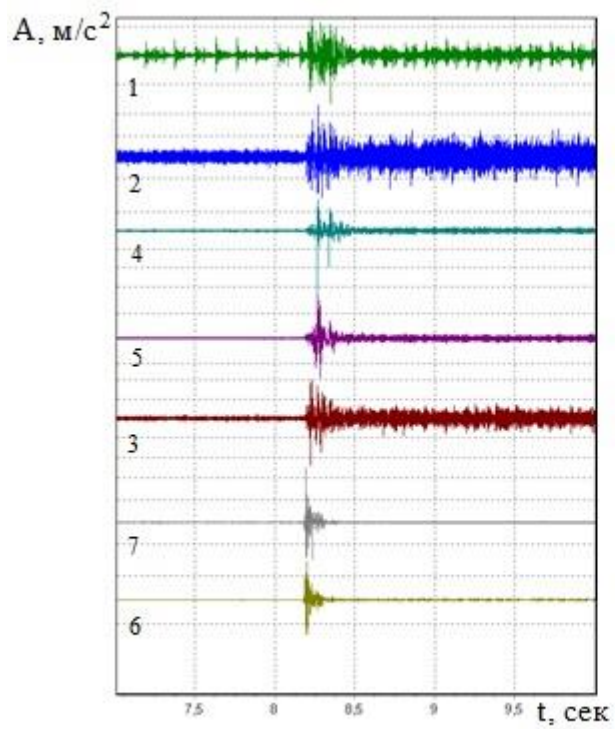


Рисунок 3.11 – Вібрація на опорах кліті № 4 при захопленні смуги

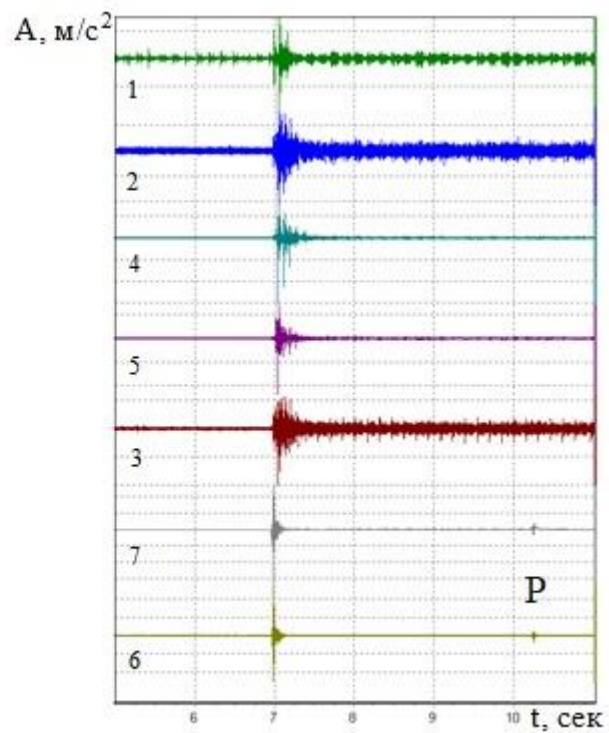
3.2.2 Чистова безперервна група клітей

В цілому тут отримані досить активні вібропроцеси в усіх точках клітей при захопленні смуги валками. Вони також відрізняються різноманітністю, пов'язаним в першу чергу технічним станом обладнання. Так на рис. 3.12 помітно, що в різний час вимірювань в кліті № 5 амплітуди коливань в точках 1, 2 і 3 була різною і швидкість їх затухання. Спостерігаються запізнення віброреакції вздовж лінії приводу.

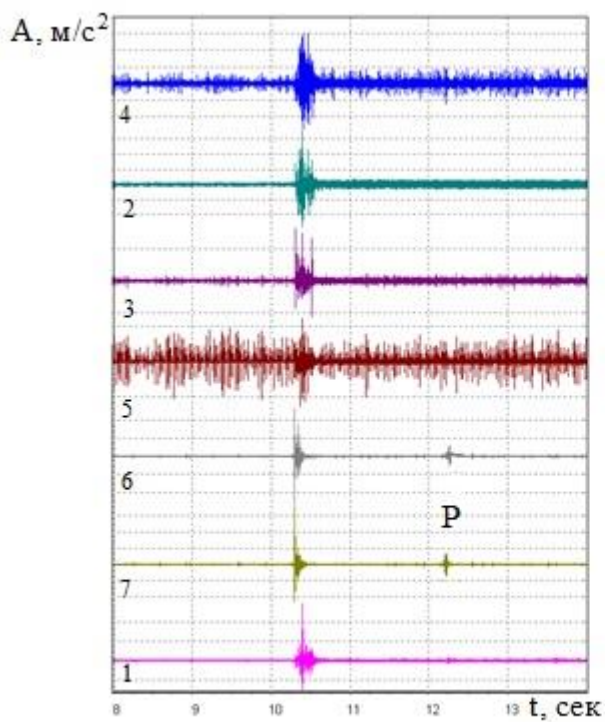
Необхідно відмітити, що сумісне порівняння вібропроцесів в ідентичних точках шести чистових клітей дає змогу прийти до якісних діагностичних висновків шляхом логічних міркувань. Так, запізнення реакції точок 2–5 в кліті № 5 віднос-



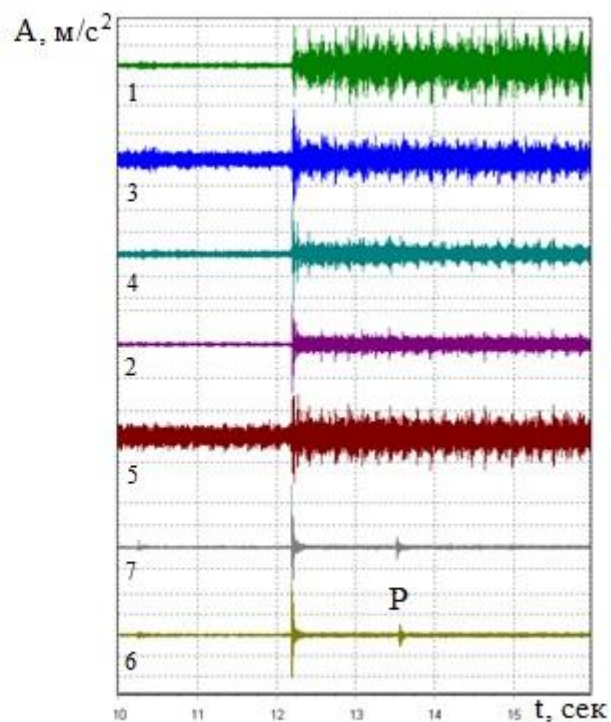
а



б



в



г

Рисунок 3.12 – Вібрація на опорах клітей № 5 (а, б), № 6 (в) і № 7 (г)
під час холостого режиму захоплення та прокатки смуги

но точок 6, 7 на рис.3.3 складає ~ 79 мс. У той же час в подібних клітках № 6 і 7 (рис. 3.4, рис. 3.13, рис. 3.14) те ж саме запізнення дорівнює 11 мс. Цей факт змусив більш детально розглянути в чому причина такого розходження.

Аналіз кінематичних схем показав, що в клітці № 5 двигун і вал – шестерня розташовані ліворуч, а в клітках № 6 – № 10 праворуч (рис. 3.15). Коли ударне крутильне навантаження і ударна хвиля з боку валків у клітці № 5 доходить до колеса редуктора, то його зубці на контакті діють на зубці шестерні ввєрх, тобто намагаються підняти (по ходу обертання) шестерню в полі осового зазору. На це потрібен деякий час. В осях і підшипниках є знос і зазори. Вісь шестерні відносно точ

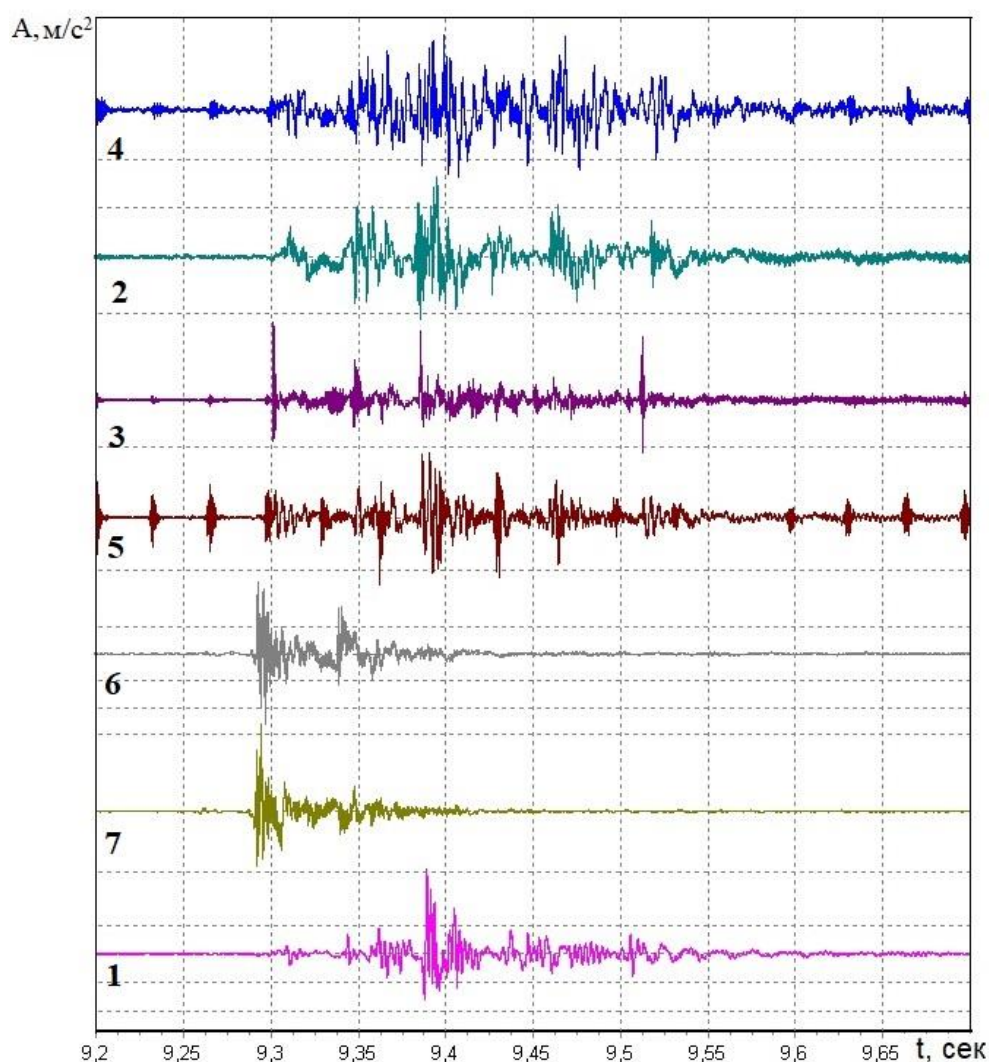


Рисунок 3.13 – Вібрація на опорах клітці № 6 при захоплені смуги.

Стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь».

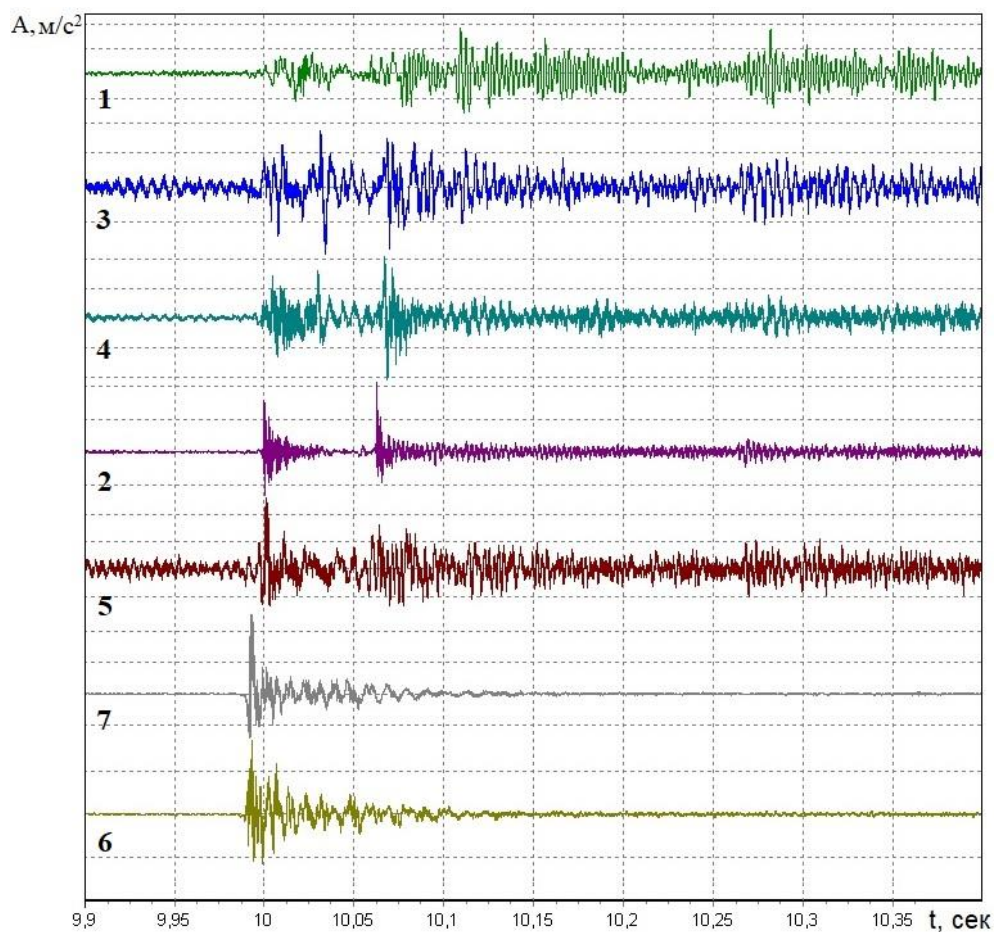


Рисунок 3.14 – Вібрація на опорах кліті № 7 при захопленні смуги.
Стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь».

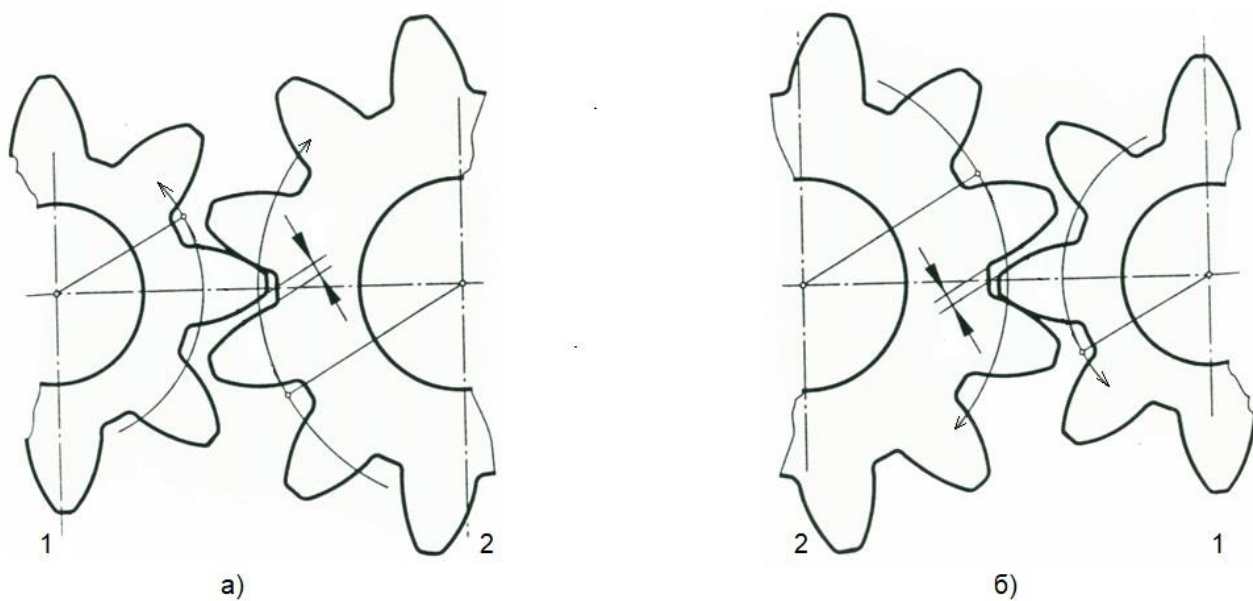


Рисунок 3.15 – Розташування шестерні 1 відносно колеса 2 в
редукторі клітей № 5 (а) и № 6 (б)

ки зачеплення зубців рухається в полі зазору вверх, що супроводжується чутливим на вухо дзвінким ударом та запізненням реакції точок 2 і 3. Чим більше зазор, тим більше часу потрібно на підняття шестерні кліті № 5 для його замикання. В інших клітях сили діють навпаки, тому подібне явище не спостерігалось. У клітях № 6 - № 10 зубці колеса притискають по ходу обертання зубці шестерні. Але зусилля з боку шестерні діє в свою чергу на зубці колеса, намагаючись також відірвати його від опори. Слід чекати, що в останніх клітях № 9, № 10, в яких маса колеса редуктора значно менша, ніж в клітях № 5, № 6, подібне явище може мати місце, особливо при збільшених зазорах в осях.

Одержано перехідні процеси, коли в кліті № 5 значення вказаного запізнення становило 10...15 мс.

Таким чином запізнення реакції точок 2–4 в кліті № 5 має діагностичну ознаку.

Шляхом періодичного вимірювання вібрації можливо визначати технічний стан редуктора в частині зносу підшипникових опор.

3.3 Зв'язок вібраційних процесів з технологією прокатки, навантаженнями і технічним станом

У багатоклітьових безперервних прокатних станах параметри прокатки смуг (зусилля, момент, швидкість, температура, опір деформації, обтиснення та ін.) між клітями істотно розрізняються. Якщо температура смуги на вході в першу кліть становить 1200°C, то в останніх клітях вона доходить до 900...950°C. Температура смуги відбивається на зусиллі і моменті прокатки. Ще більше відмінність полягає в швидкості прокатки. У кліті ДУО стану 1680 швидкість дорівнює 0,7...1,0 м/с, в останній чорновий кліті №4 2 м/с, а в останній чистової кліті 9 м/с. На станах 2000 діапазон швидкостей дорівнює 1,0...17,0 м/с. У кожній кліті прокатка ведеться з певним зусиллям і обтисненням. Тому захоплення смуги валками в кожній кліті по-різному супроводжується динамічними навантаженнями та видом перехідних процесів по крутному моменту і вібрації.

Розглянемо, яким чином режим обтиснень разом із зусиллям прокатки впливає на динамічні властивості пружної системи кліті (рис. 3.16), де M_K – жорсткість кліті; M_Π – жорсткість смуги.

В теорії прокатки при вирішенні питань формування поздовжньої різнотовщинності смуги застосовується такий параметр, як жорсткість смуги M_Π , тобто жорсткість частини металу, що знаходиться в осередку деформації (рис. 3.16).

Значення M_Π являє собою приватну похідну $\frac{\partial P}{\partial h_1}$, де P – зусилля прокатки; h_1 – товщина смуги на виході з осередку деформації.

Для практичних розрахунків прийнято використовувати вираз:

$$\frac{\partial P}{\partial h_1} \approx 0,5 \cdot \frac{P}{\Delta h}, \quad (3.1)$$

де $\Delta h = H_0 - h_1$ – абсолютне обтиснення.

Жорсткість власне пружної системи кліті M_K спільно з осередком деформації представляє собою жорсткість всієї системи: $M_K + M_\Pi$.

Прокатну кліть надають у вигляді одномасової системи (рис. 3.16), частота власних коливань якої становить [73]:

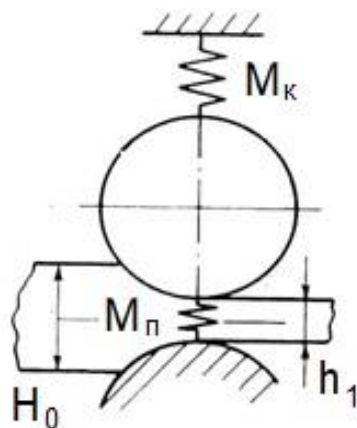


Рисунок 3.16 – Розрахункова схема кліті у вигляді одномасової системи з урахуванням смуги, що прокочується

$$\beta_{\text{кл}} = \sqrt{(M_{\text{к}} + M_{\text{п}})/m}, \quad (3.2)$$

де m – маса переважно робочих і опорних валків.

Жорсткість клітей безперервних станів обумовлена конструктивними параметрами (поперечний переріз стійок, їх довжина та ін.) і є постійною величиною.

Жорсткість смуги $M_{\text{п}}$ залежить від параметрів прокатки. Тому частота коливань кліті також залежить від параметрів прокатки. Чисельні значення $M_{\text{п}}$ і $M_{\text{к}} + M_{\text{п}}$ (при $M_{\text{к}} = 4000$ кН/мм), наведені в табл. 3.1, дають уявлення про діапазон вимірювання цих двох параметрів.

Як видно з рис.3.17 при прокаті тонкої смуги $21 \times 1030 \rightarrow 3 \times 1030$ мм зі сталі Х18Н10Т з великим опором деформації в кліті №5 $M_{\text{п}}$ становить приблизно $0,4 \cdot M_{\text{к}}$.

У той же час в кліті № 10 відношення $M_{\text{п}}/M_{\text{к}} = 3$.

Це означає, що в кліті № 5 слід очікувати більш «м'яке» захоплення, тобто меншу динаміку перехідного процесу по зусиллю, деформації кліті і розмаху вібрації, ніж в кліті № 10, в якій система жорсткіша.

З метою перевірки викладених міркувань виконали вимірювання розмаху вібрації подушки опорних валків у всіх чистових клітях стану 1680 ПрАТ «Запоріжсталь». Одночасно з цим вимірювали розмах вібрації корпусу шестеренних клітей. Приклад перехідного процесу в клітях № 5 і № 10 наданий на рис. 3.17 а, б. На рисунку є відмінність в розмаху і значенні частоти вібрації.

Відзначимо наступне. Розмах віброшвидкості подушки опорних валків явно збільшується зі збільшенням номера кліті, тобто зі збільшенням жорсткості системи. Це збільшення більш інтенсивне, ніж розмах віброшвидкості корпусу шестеренній кліті.

Таким чином, результати вимірювань показали, чим жорсткіше осередок деформації і вся система в цілому, тим більше розмах, тим більше сила удару в кліті, що відчувається навіть на слух. Першорядне значення тут відіграє дедалі біль-

Таблиця 3.1 – Жорсткість смуги M_{Π} (чисельник) та спільна жорсткість смуги і кліті $M_K + M_{\Pi}$ (знаменник), кН/мм

№ кліті		5	6	7	8	9	10
Полоса							
23×1510 → 2,5×510 мм Ст. 08кп	1	850	1740	2870	4850	5630	10060
		4850	5740	6870	8850	9630	14060
25×1400 → 5×1400 мм Ст. 20кп	2	570	930	1960	2770	4390	5370
		4570	4930	5960	6770	8390	9370
21×1030 → 4×1030 мм Ст. X18H10T	3	1400	2170	3480	5190	7270	7670
		5400	6170	7480	9120	11270	11670
21×1030 → 3×1030 мм Ст. X18H10T	4	1480	2270	4160	6170	7770	11470
		5480	6270	8160	10170	11770	15470
25×1280 → 4×1280 мм Ст. 30ХГСА	5	1110	1510	2620	4220	6670	4430
		5110	5510	6620	8220	10670	8430
24×1030 → 2,5×1030 мм Ст. 25ХГСА	6	820	1460	3210	4910	7300	7750
		4820	5460	7210	8910	11300	11750
6,0×1000 мм Ст.	7	360	640	990	1510	2030	2570
		4360	4640	4990	5510	6030	6870

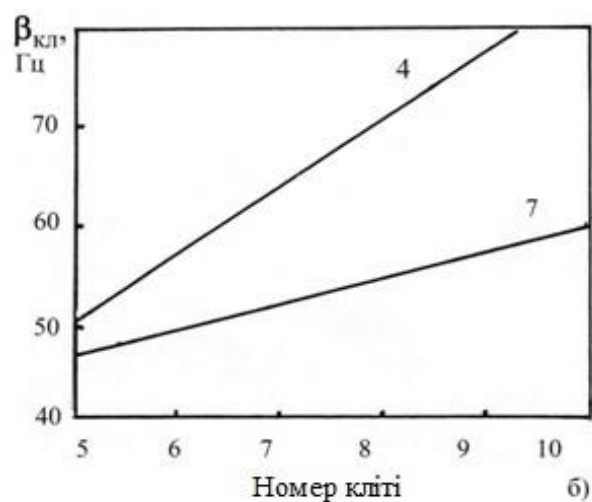
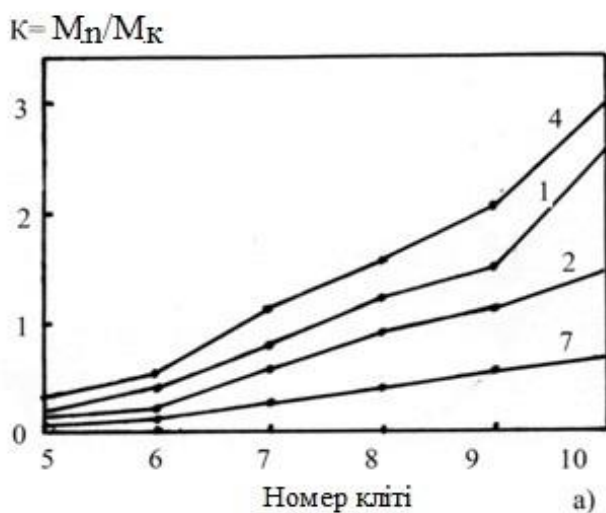


Рисунок 3.17 – Відносна жорсткість смуги K (а) та частота $\beta_{кл}$ (б) власних коливань клітей при прокатці тонких і товстих смуг:

позначки 1 – 7 відносяться до табл. 3.1

ша від кліті до кліті жорсткість смуги, оскільки жорсткість всіх шести клітей практично однакова.

Залежність розмаху віброшвидкості подушки верхнього опорного валка по клітям та розмах віброшвидкості корпусу шестеренної кліті при послідовній прокатці однієї партії смуг наведено на рис. 3.18.

Зв'язок розмаху вібрації з навантаженням.

Лінію приводу листопрокатної кліті представляють у вигляді рядної тримасової системи (рис. 3.19), де Q_1 , Q_2 , Q_3 – відповідно момент інерції ротора електродвигуна, редуктора і валкової системи; C_{12} і C_{23} – приведена жорсткість ділянки двигун - редуктор і редуктор - валки. На валкову систему в період захоплення смуги діє момент сил технологічного опору $M_{\text{пр}}$ (момент прокатки).

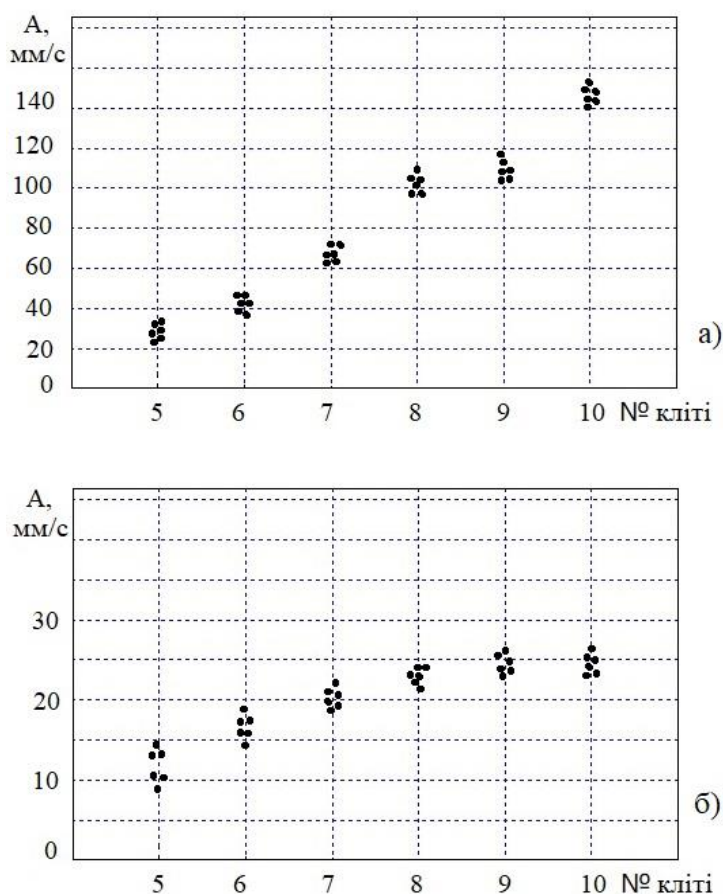


Рисунок 3.18 – Розмах віброшвидкості подушки верхнього опорного валка (а) та корпусу шестеренної кліті (б) по клітям при послідовній прокатці однієї партії смуг.

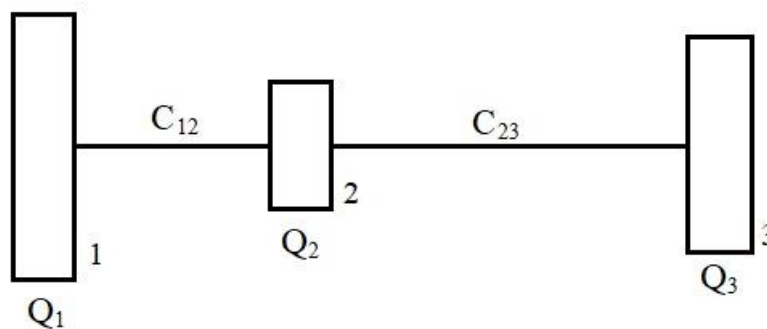


Рисунок 3.19 – Тримасова розрахункова схема лінії головного приводу валків

Відомі диференціальні рівняння руху системи по формі С.Н. Кожевнікова:

$$\ddot{M}_{12} + C_{12} \cdot \left(\frac{Q_1 + Q_2}{Q_1 \cdot Q_2} \right) \cdot M_{12} - \frac{C_{12}}{Q_2} \cdot M_{23} = -C_{12} \cdot \frac{M_1}{Q_1} \quad (3.3)$$

$$\ddot{M}_{23} + C_{23} \cdot \left(\frac{Q_2 + Q_3}{Q_2 \cdot Q_3} \right) \cdot M_{23} - \frac{C_{23}}{Q_2} \cdot M_{12} = -C_{23} \cdot \frac{M_3}{Q_3} \quad (3.4)$$

мають таке рішення за умови стрибкоподібного додавання моменту прокатки, тобто $M_3 = M_1$ [61, 88]:

–для моменту сил пружності на моторній ділянці

$$M_{12}(t) = \mu_{12} \cdot \left(1 - \frac{\beta_2^2}{\beta_2^2 - \beta_1^2} \cdot \cos \beta_1 t + \frac{\beta_1^2}{\beta_2^2 - \beta_1^2} \cdot \cos \beta_2 t \right) \cdot M_{ст}; \quad (3.5)$$

–для моменту сил пружності на шпиндельній ділянці

$$M_{23}(t) = \mu_{23} \cdot \left(1 - \frac{\beta_2^2 - \beta_{12}^2}{\beta_2^2 - \beta_1^2} \cdot \cos \beta_1 t + \frac{\beta_{12}^2 - \beta_1^2}{\beta_2^2 - \beta_1^2} \cdot \cos \beta_2 t \right) \cdot M_{ст}, \quad (3.6)$$

де $\mu_{12} = Q_1 / (Q_1 + Q_2 + Q_3)$; $\mu_{23} = (Q_1 + Q_2) / (Q_1 + Q_2 + Q_3)$;
 $\beta_{12}^2 = C_{12} \cdot (Q_1 + Q_2) / Q_1 Q_2$ – квадрат парціальної частоти; β_1, β_2 – власні частоти.

Для системи з заданими постійними пружно-масовими параметрами складова в дужках залежить від часу. Але при постійних значеннях коефіцієнтів при синусі і косинусі максимальне значення виразу в дужках завжди (в даній системі) припадає на один і той же час. Тому M_{23} і M_{12} з формул (3.5) і (3.6) можливо представити як функції сталого моменту

$$M_{23} = \text{const } 1 \cdot M_{\text{CT}} = f_1(M_{\text{CT}}), \quad (3.7)$$

$$M_{12} = \text{const } 2 \cdot M_{\text{CT}} = f_2(M_{\text{CT}}). \quad (3.8)$$

Як бачимо ці дві функції відповідають лінійній залежності $M_d(M_{\text{CT}})$ на двох ділянках лінії приводу (рис. 3.20).

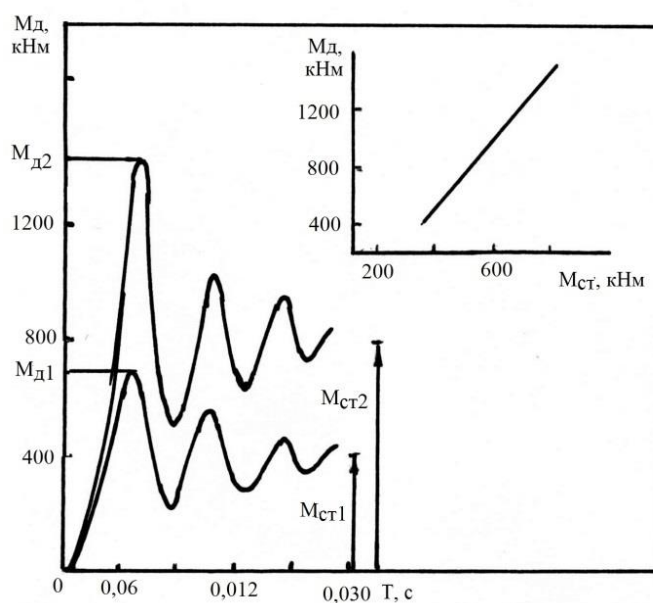


Рисунок 3.20 – Перехідний процес та максимальний динамічний момент на шпиндельній ділянці при меншому M_{CT1} та більшому M_{CT2} навантаженні на валках

Поява збурень з боку технології чи обладнання призводить до розсіювання значення $M_{ст}$ і M_d та утворення кореляційного поля (рис. 3.21), образно висловлюючись, до «розпушування» прямої $f(M_{ст})$. При цьому коефіцієнт детермінації d^2 апроксимуючої поля становить високе значення не менше 0,7.

Аналіз спільних вимірів крутного моменту та вібрації показують, що, як правило, під час захоплення смуги валками перший пік моменту і розмах віброшвидкості приймають найбільше значення, після чого відбувається загасання процесу з частотою коливань лінії приводу (рис. 2.10). У зв'язку з цим є підстави вважати, що між максимальним динамічним навантаженням M_d та максимальним розмахом A_{max} вібропараметра також є кореляційний зв'язок. Він обумовлений тим, що M_d та A_{max} в найбільшій мірі залежать від кутових зазорів в з'єднаннях шпінделів - робочі валки: зі збільшенням зазорів вони зростають.

Тому була поставлена задача встановити чи є статистичний зв'язок між A_{max} та статичним навантаженням $M_{ст}$. Якщо є, то шляхом вимірювань визначити ті кліті і точки обладнання уздовж лінії приводу, де цей зв'язок проявляється більш яскраво.

Сляби та смуги на стані 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» прокатують партіями одного сорторозміру по 10-20 шт. Протягом доби прокочується до 1000 слябів (смуг). Аналіз план-графіка показує, що за цей час прокочується 30-40 різних сорторозмірів. Згідно з даними вимірювань статичного моменту за параметрами

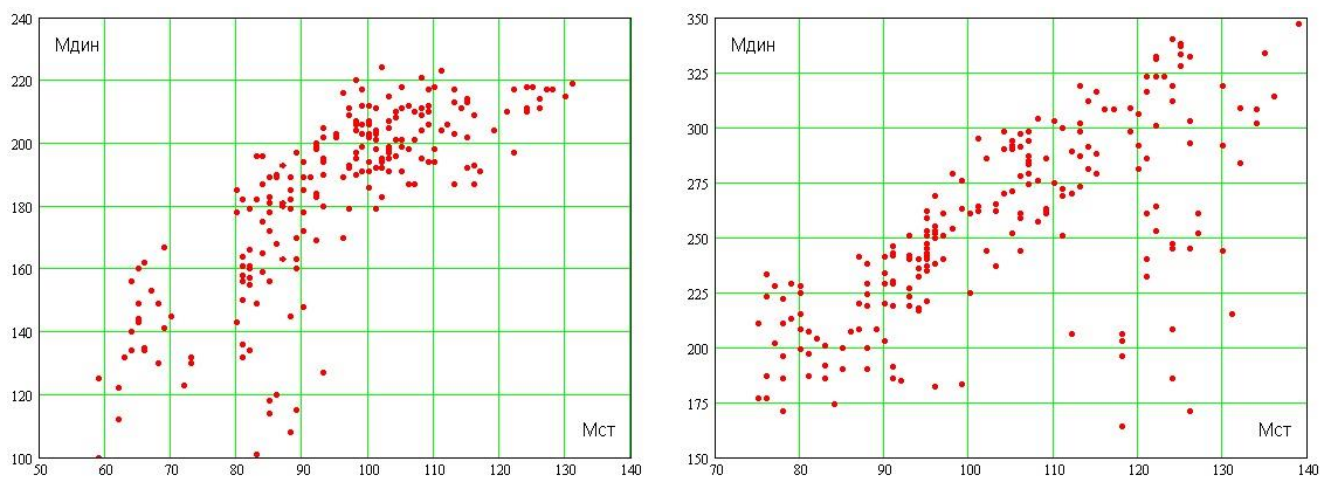


Рисунок 3.21 – Кореляційні поля $\{M_d, M_{ст}\}$ кНм в клітках № 5 і №6 [87]

двигунів в кожній кліті за 8 годин значення $M_{ст}$ змінюється в певних межах. Наприклад, в кліті № 5 від 60 до 120 кН·м. За вказаний час в кожній кліті охоплюється досить широкий діапазон значень $M_{ст}$, а разом з цим і представлений сорторозмір. Таким чином уздовж осі $M_{ст}$ отримали впорядковану множину значень від мінімального до максимального.

З одного боку цю множину потрібно розглядати як не випадкову, оскільки плавки та партії слябів що прокатуються та смуг (з їх режимами) заплановані заздалегідь. З іншого боку - як множину випадкових чисел, хоча і впорядковану, оскільки прокатка кожної смуги супроводжується випадковими збуреннями (розкид температури, товщини та ін.). У будь-якому випадку отримано множину фактичних значень статичного навантаження за певний період.

Протягом такого періоду виконали вимірювання вібрації в різних точках обладнання. Для аналізу та статистичної обробки була розроблена відповідна програма. У кожній реалізації програмно розшукувався максимальний розмах A_{max} по кожному вібродатчику.

В кінцевому підсумку для кожної з трьох клітей - № 5, № 6 та № 7 отримали по 8 кореляційних полів. Слід зазначити, що вимірювання в даних клітях виконали двічі. При найкращому технічному стані ліній приводу, зокрема після установки шпинделів з новими вкладишами («а») та перед заміною шпинделів, коли знос вкладишів був найбільший («б»). Різниця у часі між серіями вимірювань склала 15-30 діб. Прийняли, що стан шестеренної кліті та редуктора в цей період залишалося незмінним.

Аналіз результатів вимірювань і побудованих кореляційних полів показав наступне (рис. 3.22) [89].

1. У загальному випадку зі збільшенням статичного моменту $M_{ст}$ розмах вібрації A_{max} за першим (максимальним) піком збільшується.

2. Найбільш виражені поля $\{A_{max}, M_{ст}\}_{III}$ в точках на шестеренній кліті (т. 7 і 8). Тут менше розсіювання поля, яке апроксимується прямою залежністю $A_{max}(M_{ст})$. Виходить так, що чим «важче» (для прокатки) сортамент, що харак-

теризується статичним навантаженням M_{CT} , тим більше розмах вібрації в перехідний період захоплення смуги.

3. Чим більше знос бронзових вкладишів та кутові зазори в шпиндельному зчленуванні, тим більше розмах коливань A_{max} .

Результати по п.п. 2 і 3 вказують на те, що залежності як $M_d(M_{CT})$, так і $A_{max}(M_{CT})$ в більшій мірі пояснюється технічним станом шпиндельного зчленування.

4. Менш виражені залежності в полях $\{A_{max}, M_{CT}\}_p$ відповідають точкам 2 і 6. Розсіювання полів тут найбільше. Пояснення цього полягає в наступному. Зазори та знос на шпиндельній ділянці впливають на динаміку ділянки прокатна

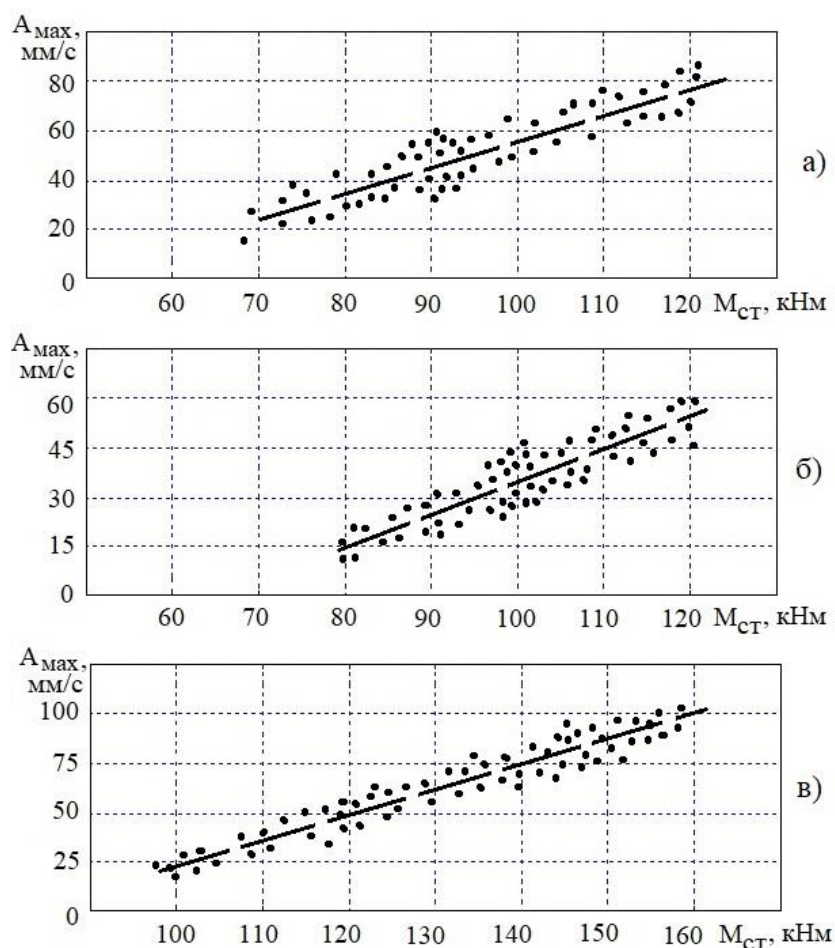


Рисунок 3.22 – Кореляційні поля $\{A_{max}, M_{CT}\}$ (максимального розмаху віброшвидкості шестеренної кліти та статичного моменту) в клітях № 5 (а), № 6 (б), №7 (в)

кліть - редуктор і редуктор - двигун. Знос зубчастих зачеплень в редукторі і муфтах додатково впливають на динаміку тільки ділянки редуктор - двигун.

В результаті подібна сумарна дія двох збурень, кожне зі своїм розкидом, призводить до того, що кореляційне поле $\{A_{\max}, M_{\text{ст}}\}_p$ на ділянці редуктор - двигун стає більш розсіяним.

Логічні міркування показують, що розсіювання даного поля (і полів в точках 1-6) залежать від поєднання ТС шпинделів і редуктора. Із найбільш виражених (крайніх) варіантів поєднань можна виділити чотири, згідно з (табл. 3.2). Ці варіанти визначимо за величиною кутових зазорів в шпинделях $\delta_{\text{ш}}$ і редуктора δ_p . Очевидно, що при хорошому стані всієї лінії (варіант 1) кореляційні поля у всіх точках повинні бути «найкращими», тобто з найменшим розсіюванням і з явною лінійною апроксимацією.

Варіант 4 є «найгіршим» - зазори в обох вузлах максимальні, що викликає найбільше розсіювання кореляційних полів.

Таким чином, маємо зразкові (еталонні) кореляційні поля в варіанті 1, з якими можна вести порівняння полів в інших (у тому числі і проміжних) варіантах. Можливо вважати, що при $\delta_{\text{ш max}}$ в варіантах 2 і 4 поля, що відносяться до шестеренній кліті, за своїми властивостями близькі.

Таблиця 3.2 – Крайні поєднання технічного стану шпинделів і редуктора

Вузол \ Варіант	1	2	3	4
Шпинделі	$\delta_{\text{ш}} = 0$	$\delta_{\text{ш max}}$	$\delta_{\text{ш}} = 0$	$\delta_{\text{ш max}}$
Редуктор	$\delta_p = 0$	$\delta_p = 0$	$\delta_p \text{ max}$	$\delta_p \text{ max}$

3.4 Аналіз діагностичної інформативності вимірюваних параметрів

Представлені в розділі 2 види перехідних процесів та одержані результати вимірювань в розділі 3 вказують на те, що параметри перехідних процесів пов'язані з технологією прокатки і ТС обладнання. При різноманітності цих зв'язків завдання складає в тому, щоб виявити, обґрунтувати і сформулювати діагностичну інформативність вимірюваних параметрів вібрації.

У роботі [21] вперше показано, що час запізнювання реакції ділянок лінії приводу, яке визначається за сигналами вібродатчиків при захопленні смуги валками, є діагностичним параметром, пов'язаним із зносом і зазорами в зчленуваннях обладнання. Чим більше час запізнювання, наприклад, шпіндельної ділянки $\tau_{ш}$, тим більше зазори в зчленуваннях валок - шпіндель. Наведено порівняння результатів вимірювань при нових і зношених бронзових вкладишах, що підтверджує зазначену закономірність. Розроблено кілька способів діагностування, частина з яких захищена патентами України.

Разом з тим слід зазначити, що метод діагностування за часом запізнювання та його можливості до кінця не вичерпано. Вимірювання ІЧМ НАНУ виконані в декількох клітках БШШС, що відрізняються силовим та швидкісним режимом. Необхідний подальший розвиток цього методу.

Наприклад, залишається не з'ясованим, як поширюється фронт ударного крутильного імпульсу від валків через шпінделі, шестеренні валки, колеса і шестерні редуктора до двигуна. Як впливає на його поширення стан інших ділянок лінії, та які є можливості їх визначати. Цікавим питанням з точки зору механіки є не тільки час τ , але і швидкість поширення (руху) фронту імпульсу вздовж лінії приводу валків.

Розглянемо ряд цілеспрямовано виконаних вимірювань.

У кліті ДУО сляби подвоєної довжини $2L$ задаються зі швидкістю в $1,5 \dots 1,7$ разів більше, ніж окружна швидкість валків. Це призводить до підвищеного удару сляба об валки та розмиканню зазору, перш за все, в зчленуванні валок - шпіндель. В результаті коефіцієнт динамічності на моторній ділянці при прокатці сля-

бів збільшується і в середньому становить $K_{cp2} = 3,7$ в той час як при прокатці слябів довжиною L_0 , які задаються зі швидкістю, узгодженої з валками, дорівнює $K_{cp1} = 2,3$ (при одному і тому ж стані лінії).

Виконали три серії вимірювань в трьох точках (виходячи з їх доступності) значень τ щодо показань датчика на прокатній кліті (рис. 3.23) при різному зносі (напрацюванні) бронзових вкладишів шпинделів.

У результаті отримали не тільки якісну тенденцію, а й можливість кількісної оцінки збільшення часу запізнювання ділянок в залежності від ТС лінії приводу. Очевидно, що при даній технології головний внесок в τ ділянок обумовлений зносом бронзових вкладишів та утворюваним кутовим зазором на шпиндельній ділянці.

Таким чином, наведені результати вимірювань підтверджують залежність часу запізнювання τ від стану вкладишів шпинделів [21, 73]. Чим більше їх знос на шпиндельній ділянці, тим більше кутовий зазор і тим більше час запізнювання. Чим далі від робочої кліті (т. К) розташована точка вимірювання, тим більше τ .

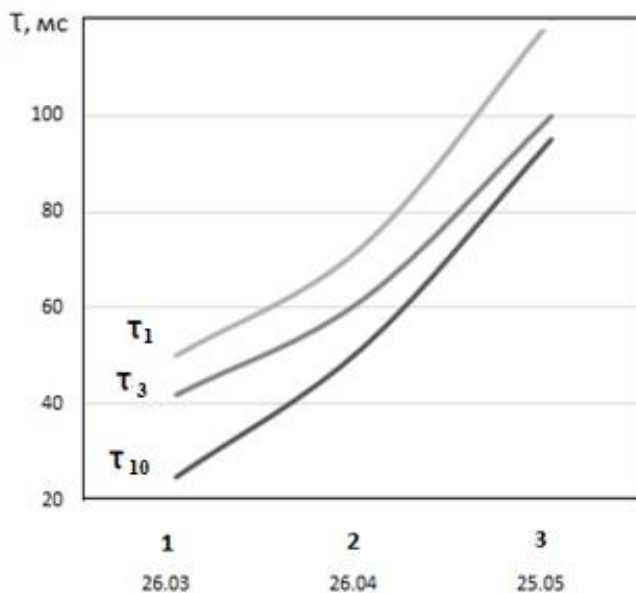


Рисунок 3.23 – Результати вимірювань середнього часу запізнювання в точках 1, 3, 10 відносно т. К при прокатці слябів подвоєною довжини та різному стані шпиндельної ділянки (див. рис. 3.25)

Необхідно також відзначити досить велику різницю в τ між порівняно добрим ТС та незадовільним ТС: вона становить 57...69 мс, тобто відрізняються в 2,3...3,5 рази. Це вказує на те, що застосовуючи вібродатчики можна надійно і з достатньою точністю визначати, наскільки змінюється час τ запізнювання реакції ділянок.

У роботі [90] наведено приклади як за швидкістю розповсюдження ударної хвилі вздовж конструкцій визначати відстань до місця збурення. Відомо також, що за швидкістю розповсюдження ультразвукової хвилі визначають тріщину в конструкції чи в зварному з'єднанні.

У нашому випадку відстань S і значення τ між вібродатчиками відомі (рис. 3.24). Швидкість розповсюдження імпульсу складає:

$$V_i = S_i / t_i. \quad (3.9)$$

Відомі дані про швидкість поширення крутильної хвилі зсуву в суцільному сталевому круглому валу [81, 85, 86]:

$$V_o = \sqrt{G/\rho}, \quad (3.10)$$

де, ρ – щільність, G – модуль зсуву.

Згідно літературним даним $V_o = 3200$ м/с.

Розглянемо результати розрахунку швидкості проходження крутильним ударним імпульсом ділянок за даними часу τ і відстаней (рис. 3.24, табл. 3.3). У таблиці також наведено значення коефіцієнта (рис. 3.25)

$$K = V_o / V_i. \quad (3.11)$$

Природно, що при постійній відстані, чим більше τ , тим менше швидкість імпульсу. Тут більш важливо те, що вперше за результатами непрямих вимірю-

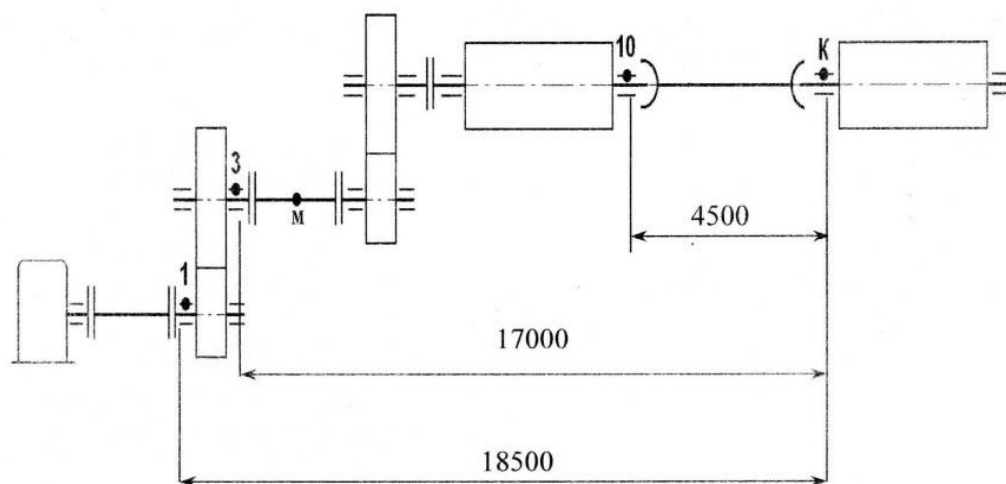


Рисунок 3.24 – Відстань між точками вимірювань в кліті ДУО

Таблиця 3.3 – Час запізнювання ділянок та швидкість поширення ударного імпульсу

Ділянка		1	2	3
Досвід	τ, с	0,028	0,044	0,051
	V, м/с	161	386	363
1	K	20	8	9
	τ, с	0,056	0,065	0,075
	V, м/с	80	262	247
2	K	40	12	13
	τ, с	0,097	0,101	0,116
	V, м/с	46	168	159
3	K	70	19	20
	Δτ ₁₋₃ , с	0,007	0,010	0,015
	V ₁₋₃ , м/с	214	150	100
4	K	15	20	32

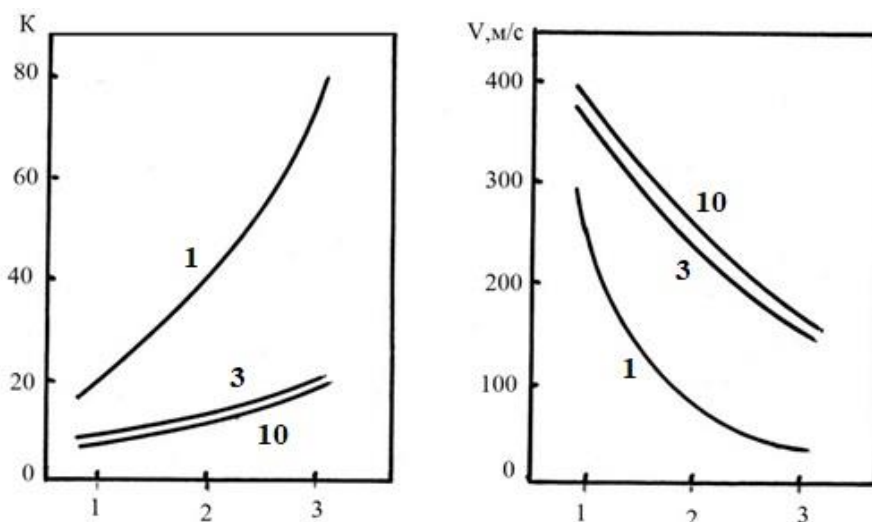


Рисунок 3.25 – Залежність коефіцієнту K і швидкості V розповсюдження ударного імпульсу по ділянкам 10, 3, 1 при трьох різних (1, 2, 3) ТС обладнання лінії кліті ДУО

вань визначена фактична швидкість імпульсу в реальній механічній системі, яка містить ряд зчленувань. Ця швидкість на два порядки (від 9 до 20) менше здвигової швидкості в суцільному сталевому валу - 3200 м/с.

За різницею $\tau_{1-3} = \Delta\tau_1 - \Delta\tau_3$ оцінили швидкість руху імпульсу між входом та виходом редуктора. Ця швидкість V_{1-3} склала 214-100 м/с. Як бачимо, на всіх ділянках фактична швидкість проходження імпульсу значно менше швидкості 3200 м/с.

Необхідно зазначити наступне. Лінія головного приводу валків прокатної кліті не є суцільним тілом. У лінії кліті ДУО міститься до 10 зчленувань, тобто її конструкція є неоднорідною, не суцільною. Наявність стиків, місцевої пружності контактів, масла між ними різної консистенції (в тому числі з урахуванням пори року), забруднення та окалини разом зі зносом сприяють зниженню швидкості поширення хвилі від однієї точки до іншої та від робочої кліті до редуктора і двигуна. У роботі [83] відзначається, що з цих причин відбувається зниження швидкості до $V^1 = \alpha \cdot V_0$, де коефіцієнт $\alpha \leq 1$ враховує подовження шляху поширення хвилі. Для коробки передач трактора ДТ-54 коефіцієнт $\alpha \leq 0,3$, тобто стосовно нашого випадку швидкість складе $V^1 = 960$ м/с. Наведені оцінки також підтвер-

джують зменшення швидкості проходження імпульсу між точками 1 та 3 редуктора.

На наведені оцінки вплинули похибки визначення значення τ , обчислення якого здійснювалося шляхом ручного пошуку початку фронту вібрації. Середньоквадратичне значення σ_τ по 15-20 вимірам склало від 2 до 4 мс. Такий незначний розкид τ у порівнянні з його середнім досить великим значенням, (на порядок - два більше), природно, не вплинув на викладені результати.

Якби швидкість ударного імпульсу становила 3200 м/с, то відстань до точки 1 він досяг би за 5,7 мс, що істотно менше фактичного часу.

Таким чином, не тільки час запізнювання реакції ділянок, а й фактична швидкість імпульсу є діагностичною ознакою стану лінії приводу.

Наведені результати вимірювань та розрахунків дозволяють прийти до наступного.

1. При завданні слябів зі швидкістю, більшою окружної швидкості відбувається розмикання зазору в зчленуванні валок - шпиндель тим більше, чим більше зазор. Тим більший час необхідно для замикання зазору.

2. Збільшення часу замикання зазору призводить до зменшення поширення швидкості ударного імпульсу вздовж лінії приводу.

3. Значення τ_i та їх діапазон зміни чималі для їх реєстрації за показаннями вібродатчиків в процесі захоплення смуги валками та розрізнення стану ділянок.

4. Запропоновано нову діагностичну ознаку – середня швидкість руху ударного імпульсу до вимірюваної точки, і на цій підставі спосіб діагностування, що дозволяють глибше та надійніше визначати стан ділянок.

Розглянемо наступний приклад, коли вимірювання в кліті ДУО виконали при двох технологіях (1) і (2) – прокатка слябів довжиною L (1) і $2L$ (2) при одному і тому ж стані обладнання. Як видно з (рис. 3.26) запізнювання реакції шпиндельної ділянки при завданні слябів з більшою швидкістю ($2L$) в 2 рази більше, ніж при завданні сляба (L) зі швидкістю, яка узгоджена із швидкістю валків. Отже, при ударах сляба $2L$, що має відповідно в 2 рази більшу масу, об валки відбува-

ється розмикання зазорів в зчленуванні валок - шпиндель на більшу величину, ніж при ударі сляба L .

Сталося також збільшення часу реакції точок № 6 і M за рахунок шпиндельної ділянки (τ_{11}). Однак, тут цікаво те, що відносні значення τ залишилися вельми близькими, якщо врахувати похибки визначення τ (табл. 3.4). Знаючи відстань між датчиками підраховали швидкість розповсюдження ударної хвилі (табл. 3.4). Як бачимо вона має найменше значення на шпиндельній ділянці. Це уповільнення швидкості має місце за рахунок збільшення часу на закриття зазорів на цій ділянці.

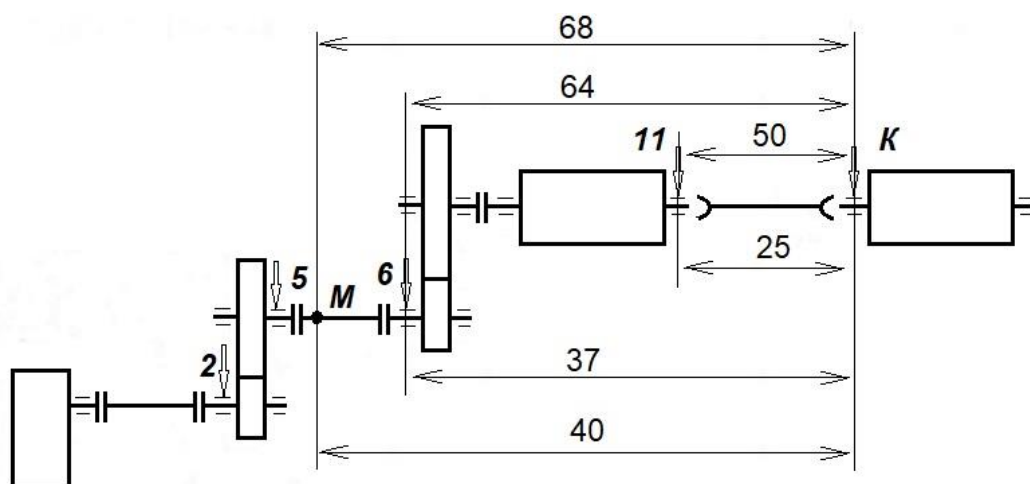


Рисунок 3.26 – Середні значення часу запізнювання реакції точок 11, 6 і M при прокатці коротких (L , внизу) та довгих ($2L$, вгору) слябів

Таблиця 3.4 - Запізнення в точках 11, 6 і M і швидкість їх досягнення

τ		τ_{11}	τ_6	τ_M	τ_{6-11}	τ_{M-11}	τ_{M-6}
Варіант	2L	50	64	68	14	18	4
	L	25	37	40	12	15	3
2	V , м/с	90	242	250	786	694	375
1	V , м/с	180	419	425	917	833	500

Доцільно розглянути залежність швидкості імпульсу від відстані (рис. 3.27). Відстані 4,5 м, 15,5 м та 17 м відлічуються від датчика К на кліті. Спостерігаємо лінійну залежність при двох технологіях, при яких по різному відзначається ТС шпindel'ної ділянки. Якщо на цій ділянці гальмується швидкість за рахунок зазору, то в інших ділянках швидкість збільшується, оскільки зазори подібної величини і характеру відсутні.

Між ланками в середині лінії швидкість значно збільшується (точки 1, 2, 3), але залишається меншою ніж значення $V_0 = 3200$ м/с. Та тут цікаво те, що стан шпindel'ної ділянки на ці швидкості майже не подіє: їх значення відрізняються до 1,3 рази за рахунок похибок визначення різниці часу між цими точками. Відзначимо, що середня швидкість крутильної ударної хвилі між ланками в середині лінії склала 684 м/с, що в 4,7 рази менше значення V_0 . Тому слід вважати, що ТС ділянок М-6, 6-11, М-11 залишався без змін.

Таким чином приходимо до висновку, що швидкість розповсюдження ударного імпульсу вздовж лінії приводу також може слугувати діагностичними властивостями.

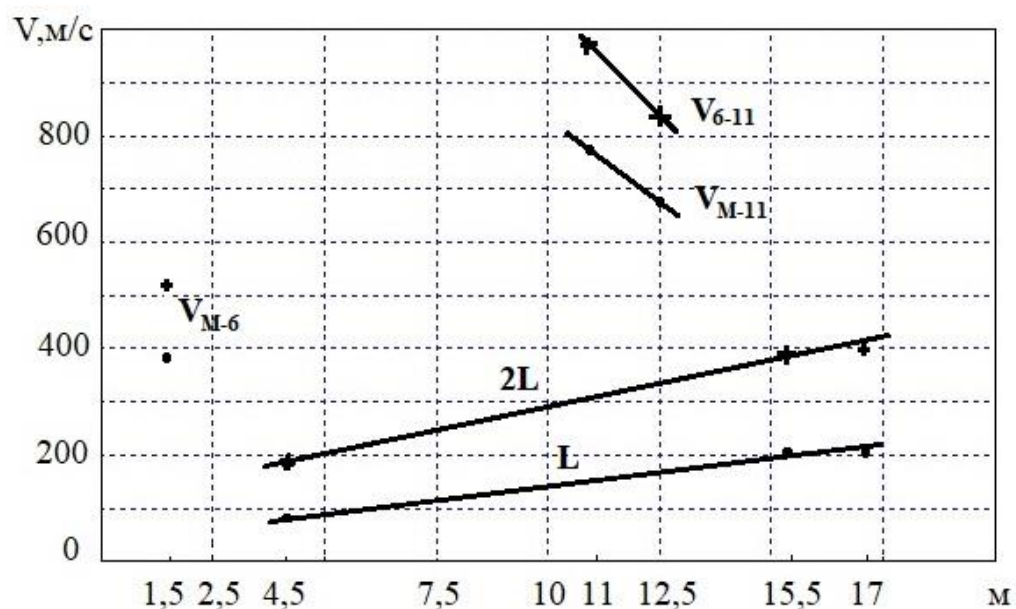


Рисунок 3.27 – Залежність швидкості руху ударної хвилі від відстані між ділянками при двох технологіях прокатки в кліті ДУО: одинарна (х) і подвійна (•) довжина слябів.

3.5 Деякі питання з діагностики

Чорновим клітям БШШС 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» властива особливість, яка полягає в тому, що крім роздільної прокатки слябів (довжиною L) в парах клітей № 0 - № 1, № 2 - № 3, № 3 – № 4 ведеться безперервна прокатка слябів подвоєною довжиною $2L$. Подібне розходження в технологіях та режимах роботи клітей продовжує викликати певну дослідницьку цікавість, незважаючи на те, що динаміка перехідних процесів в лініях приводу клітей в обох режимах роботи досліджувалась в [21, 73]. Зокрема, шляхом вимірювань встановлені особливості перехідних процесів по крутному моменту, коли захоплення смуги відбувається в першій, а потім у другій кліті, отримані режими прокатки з підпором та натягом.

При безперервній прокатці виникає ряд нових питань: наскільки швидко міжклітьове зусилля через смугу передається від попередньої кліті до наступної кліті, коли в ній відбувається захоплення смуги; від яких параметрів залежить час передачі зусилля та ін. При математичному моделюванні динаміки безперервної прокатки в більшості випадків приймається миттєва передача зусилля. Разом з цим є групи з великою міжклітьовою відстанню (кліті № 2 - № 4 та № 3 - № 4) або зі специфікою технології, наприклад, дрібносортні або дротяні стани. Тут в смугі можуть відбуватися хвильові процеси, і тоді потрібна інша модель міжклітьової взаємодії. Шляхом вимірювання крутних моментів зазначені питання не вирішуються, оскільки відбувається запізнювання реакції валів на додавання навантаження до валків.

Особливість чорнової групи стану 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» складається також в різній відстані між клітями відповідно: $L_{0-1} = 6,25$ м; $L_{2-3} = 19$ м; $L_{3-4} = 25$ м та в різній товщині смуги що прокочується. На вхід в двовалкову кліть ДУО надходять сляби товщиною $H_0 = 150...160$ мм, шириною 980-1500 мм. У проміжках між клітями товщина прокату становить: $h_{0-1} = 125$ мм; $h_{2-3} = 55$ мм; $h_{3-4} = 35$ мм. Очевидно, що смуга в міжклітьових проміжках має різну поздовжню жорсткість.

Тому виникають додаткові питання, які раніше не порушувалися. Наприклад, такі.

1. Наскільки час передачі зусилля в смузі до попередньої кліті (τ_{0-1} , τ_{2-3} , τ_{3-4}) залежить від міжклітьової відстані.
2. У чому полягає інформативність цього часу в плані технології та діагностики.
3. Як поширюється ударний імпульс крутного навантаження з боку робочої кліті уздовж лінії приводу в напрямку двигуна при власне захопленні смуги валками та взаємодії клітей (мається на увазі реакція попередньої кліті на захоплення смуги в наступній кліті).

Метод рішення задачі полягає у визначенні часу запізнювання різних ділянок по реакції сигналів вібродатчиків, встановлених на корпусному обладнанні уздовж ліній головного приводу. Попередні виміри показують, що в цілому сигнал вібродатчика швидко реагує на ударне крутильне навантаження. Розглянемо деякі результати вимірювань.

Під час захоплення смуги валками клітей № 1, № 3 та № 4 обладнання ліній попередніх клітей моментом пружних сил і вібрацією реагує на передачу збурення через прокатувану смугу (див. рис. 2.10). У цьому випадку добре помітне запізнення реакції в попередній кліті (див. рис. 3.4, рис. 3.6, рис. 3.10). У кліті ДУО воно становить для шпиндельної ділянки 5 мс, для точки 7 – 6 мс, для точки 6 редуктора 8 мс. Тобто лінія приводу цієї кліті знаходиться в напруженому стані, оскільки ведеться прокатка, всі зазори знаходяться в закритому стані. Тому час проходження ударної хвилі значно менший, а швидкість збільшується. Для шпиндельної ділянки $V_{ш} = 900$ м/с, шестеренної кліті (точка 7) $V_7 = 2583$ м/с, редуктора (т.6) $V_6 = 2125$ м/с. Одержані швидкості значно менші, ніж 3200 м/с, але їх значення обумовлені тим, що лінія приводу складається з ділянок, вузлів, контактів та з'єднань, що і призводить до зменшення швидкості ударної хвилі. Подібні результати одержали для клітей № 2 і № 3 (див. рис. 3.5, рис. 3.6, рис. 3.10). На-

приклад, в кліті № 2 для відповідних точок згідно з рис. 3.1 $V_8 = 947$ м/с, $V_2 = 2275$ м/с; в кліті № 3 $V_8 = 896$ м/с, $V_2 = 2451$ м/с.

Таким чином, не тільки час запізнення ділянок, але й швидкість розповсюдження ударного імпульсу по ділянках має зв'язок з ТС обладнання.

Тут виникає питання, чи пояснюється цей час хвильовим процесом передачі фронту крутильного навантаження.

Відстань між точками $L_{K-11} = 4,5$ м. При швидкості поширення крутильного (здвигового) навантаження $V = 3200$ м/с час τ_{11} має скласти 1,41 мс, що істотно менше, ніж виміряне $\tau_{11} = 13$ мс. Звідси випливають три висновки.

Перший підтверджує справедливість уявлення ліній приводу прокатних клітей у вигляді дискретних мас, пов'язаних пружними ланками, які практично миттєво передають момент наступній масі. Це означає таке ж швидке навантаження шпинделя після замикання зазору.

Другий висновок полягає в тому, що в зчленуваннях лінії приводу при замкнених зазорах в місцях контакту (зів головки шпинделя - округлена поверхня вкладиша, площа вкладиша - вилка валкової муфти та ін.) знаходиться масло різної в'язкості і товщини плівки, сторонні фракції типу окалини, мікро тріщини та ін. Це призводить до формування природного часу запізнювання τ_{11} та інших, які збільшуються зі збільшенням відстані від кліті.

Згідно з третім висновком час природного запізнювання ділянок, визначений при взаємодії клітей, в кліті ДУО можливо прийняти в якості базового значення для порівняльної оцінки з часом запізнювання ділянок, отриманим при власне захопленні сляба в кліті ДУО.

Вирішимо питання часу запізнення передачі зусилля (ударної хвилі) через смугу між двома клітями, тобто від наступної до попередньої.

На рис. 3.28 наведена характерна реакція вібродатчиків кліті ДУО під час безперервної прокатки на захоплення сляба валками кліті № 1.

За даними датчиків на робочих клітях цієї пари визначили середнє значення часу передачі зусилля через смугу від кліті № 1 до кліті ДУО. Цей час склав

$\tau_{0-1\phi} = 44,7$ мс. Розрахунковий час проходження відстані L_{0-1} становить: $\tau_{0-1p} = 6,25/V_0 = 2$ мс. Тут прийнято $V_0 = 3200$ м/с. Як бачимо, фактичне та розрахункове значення часу τ_{0-1} значно відрізняються. Фактична швидкість хвилі в гарячому металі між клітками ДУО - № 1 дорівнює $V_\phi = 6,25/0,0447 = 140$ м/с.

Фактичне середнє значення часу передачі міжклітьового зусилля від кліті № 3 до кліті № 2 склало $\tau_{3-2\phi} = 67$ мс (при розрахунковому $\tau_{3-2p} = L_{3-2}/V_0 = 19/3200 = 5,9$ мс), а швидкість пружної хвилі в гарячому металі $V_\phi = 19/0,067 = 284$ м/с. Тут фактичні та розрахункові значення відрізняються на порядок.

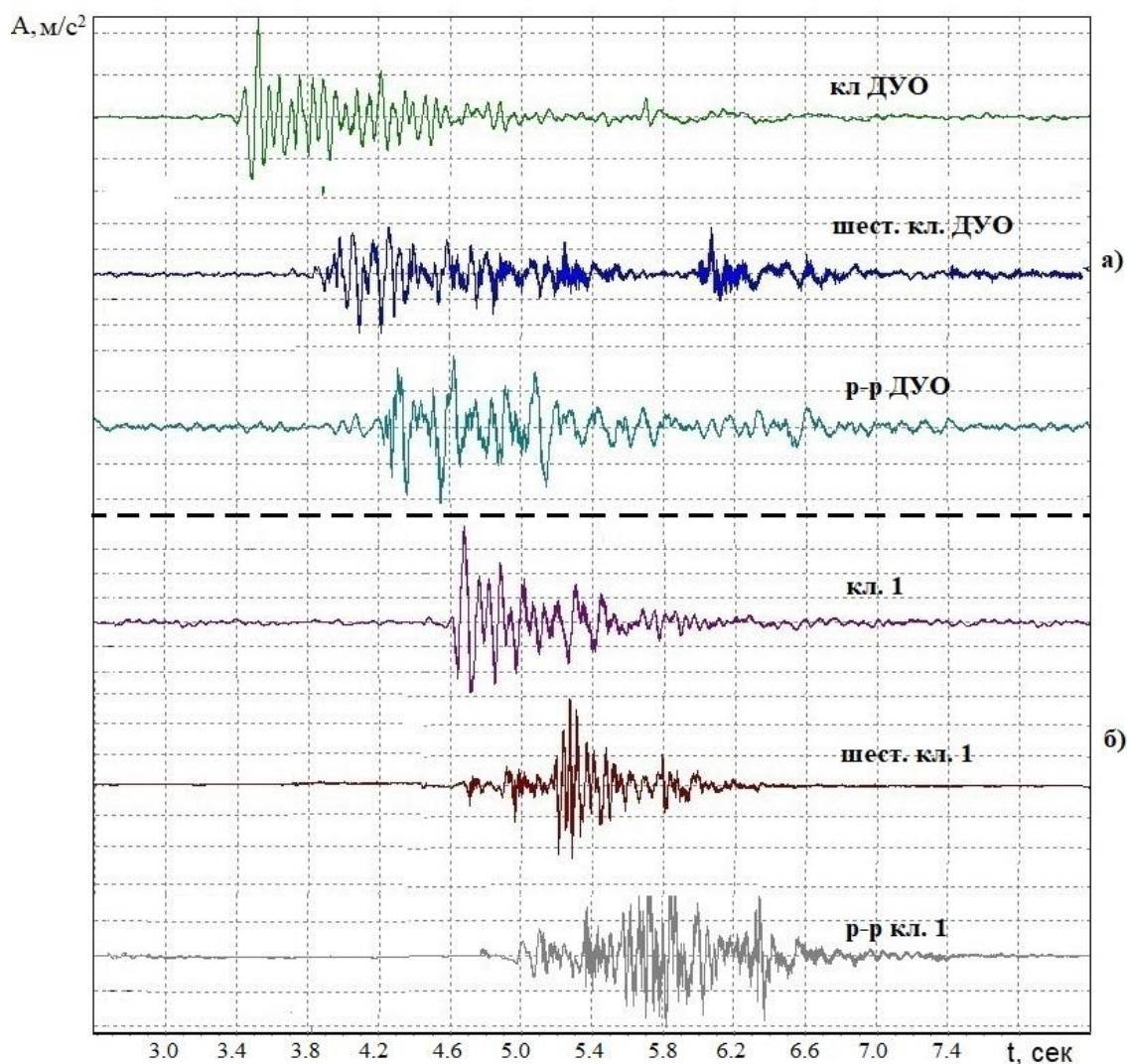


Рисунок 3.28 – Захоплення сляба подвійної довжини валками кліті ДУО (а)
та подальше захоплення цього сляба валками кліті № 1 (б)
разом з прокаткою в кліті ДУО

Фактичне запізнення реакції кліті № 3 на захоплення смуги в кліті № 4 в середньому склала $\tau_{4-3} = 73$ мс, тому швидкість пружної хвилі між цими клітями $V_{4-3} = 24/0,073 = 329$ м/с. Як бачимо, всі значення швидкостей V_{1-0} , V_{3-2} , V_{4-3} одного порядку. Зменшення цих швидкостей в розпеченій смузі погоджується з відомою закономірністю зменшення швидкості звуку в металі зі збільшенням температури.

Необхідно зазначити, що подібні результати отримані вперше. На даний час це має перш за все пізнавальне значення. Але має місце та обґрунтування вважати, що значення цієї швидкості залежить від розмірів і температури смуги, марки сталі, швидкості прокатки. Визначення цих зав'язків можливо мати практичне значення в діагностичній площині.

Підводячи підсумки, відзначаємо наступне.

1. Чим далі від робочої кліті розташований датчик, тим більше абсолютне значення часу запізнювання. Запізнення збільшується по мірі зносу бронзових вкладишів універсальних шпинделів та відповідно кутових зазорів. Тому цей час є діагностичною ознакою ТС шпиндельної ділянки.

2. Відносні значення τ , тобто між точками всередині системи, також можуть бути пов'язані з ТС ділянок.

3. Зі збільшенням швидкості завдання смуги в валки абсолютне значення τ_i зростає. Про це свідчать результати вимірювань в кліті ДУО при прокатці «довгих» та «коротких» слябів.

4. Вперше для трьох пар клітей з безперервною прокаткою шляхом вимірювань визначено час природного запізнювання реакції ділянок попередньої кліті на ударне навантаження через смугу (підпір, натяг та їх відсутність), що діє при захопленні смуги валками наступної смуги. Встановлено, що цей час більше розрахункового з урахуванням хвильових явищ, що пояснюється наявністю в місцях контакту зчленувань деталей шару мастила, окалини, мікротріщин, нерівностей від зносу та ін. У зв'язку з цим є підстави цей час також прийняти в якості опорної діагностичної ознаки.

5. Вперше шляхом вимірювань визначено час проходження хвилею міжклітьового зусилля в розпеченій смузі до попередньої кліті, коли захоплення смуги відбувається в наступній кліті. Цей час збільшується зі збільшенням відстані між клітьями.

3.6 Висновки

1. Шляхом вимірювання вібрацій показана вібраційна взаємодія через товсту смугу пар чорнових клітей та можливість використання даного явища в діагностичних цілях.

2. Показані широкі можливості застосування часу запізнювання реакції вібродатчиків при розробці способів та методів діагностування.

3. Встановлено зв'язок розмаху вібрації в сталому режимі прокатки з сортаментом що прокочується через жорсткість смуги в осередку деформації – чим більше жорсткість, тим більше розмах.

4. Встановлено кореляційний зв'язок у вигляді поля максимального розмаху $A_{\max}$ вібрації при захопленні смуги валками та статичного моменту $M_{\text{ст}}$ двигуна під час прокатки. Показано, що апроксимуюча поле залежність $A_{\max}(M_{\text{ст}})$ може бути використано для діагностичних досліджень.

5. Встановлена залежність швидкості розповсюдження ударної хвилі вздовж ділянок лінії приводу від NC (зносу і зазорів) обладнання. Значення швидкості мають діагностичні ознаки.

6. Вперше шляхом вимірювань одержано значення швидкості ударної хвилі, яка розповсюджується через розпечену смугу від кліті, в якій відбувається захват смуги, до попередньої кліті, в якій ще продовжується прокатка.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДІВ І СПОСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЛІНІЙ ГОЛОВНОГО ПРИВОДУ ВАЛКІВ

4.1 Аналіз відомих способів визначення технічного стану прокатних клітей

В останнє десятиліття набув розвиток новий напрямок в діагностуванні прокатних станів, заснований на використанні особливостей і різноманіття видів перехідних процесів при захопленні смуги валками [21, 73, 87]. Йдеться про те, що в механізмах прокатних клітей містяться зазори, що утворюються через зношення зчленувань елементів [91]. Наприклад, між подушками валків й стійками станини кліті, в зчленуванні хвостовик приводного валка - валкова муфта - вкладиші - головка шпинделя, в осях та підшипниках валів, в зубчастих зчепленнях редукторів і муфт. Ці зазори проявляються в тому, що роблять істотний вплив, перш за все на ударні навантаження при захопленні смуги валками та не піддаються безпосереднім вимірам під час роботи стана [92]. Тому завдання роботи полягало також у тому, щоб повніше визначити зв'язок перехідних процесів при захопленні смуги з станом обладнання в частині зносу контактуючих елементів. Тим більше, що в сталому режимі роботи (холостий хід або прокатка) вимір зносу майже неможливий.

У роботах [21, 73] показано, що сильною діагностичною ознакою, пов'язаною зі станом зносу та зазорів, є час запізнювання реакції ділянок лінії головного приводу валків. Наприклад, чим більше розкритий кутовий зазор в момент захоплення смуги в зчленуванні шпиндель - валок, тим більше часу необхідно для його замикання і тим більше запізнювання реакції ділянок лінії на проходження ударного навантаження. Такий загальний взаємозв'язок між часом запізнення та ТС ділянок лінії приводу заявлений в патентах [53, 55-57]. Це способи опосередкованого визначення зносу та його розвитку за часом запізнення реакції. Необхідно відзначити, що у зв'язку з відносною в часі новизною подібні способи ще не знайшли

свого впровадження на прокатних станах. З цього випливає, що необхідний подальший розвиток зазначеного вище нового підходу до визначення ТС обладнання.

Поставлена задача полягає в тому, щоб показати деякі шляхи та можливості цього розвитку.

4.2 Логістичний підхід до діагностування за часом запізнювання

Прокатна кліть разом з лінією головного приводу валків являє собою складну механічну систему. Характерним режимом роботи кліті є періодичний ударний режим навантаження при захопленні смуги валками, при якому відбувається поширення ударного імпульсу (фронту крутильного моменту) в сторону електродвигуна. Час запізнювання реакції ділянок лінії приводу, досить просто визначається за сигналами вібродатчиків, як показано раніше, вельми інформативно. Однак аналіз шляхів поширення ударного навантаження призводить до висновку, що в результаті отримане значення часу τ в тих чи інших ділянках можливо пояснити двояко. У зв'язку з цим розробили логістичний алгоритм, що дозволяє знаходити більш надійні та вірні рішення. Перш за все необхідно послідовно під час експлуатації стана порівнювати перехідні процеси як в точках окремо взятої кліті в часі, так і між точками суміжних клітей. Це пов'язано з конструктивною подібністю вузлів обладнання. Наприклад, рис. 4.1 одержаний через 27 діб після вимірів, представлених на рис. 3.3. Ремонтні дії в кліті № 5 не проводились. Помічаємо подібність процесів, але час запізнювання реакції точок значно збільшився. Так, в т.4 було $\tau_4 = 82$ мс, стало 145 мс. Змінився вид реакції в точках 6 та 7. В той же час при бурхливій реакції по розмаху в клітях № 8 і № 9 (рис. 4.2, рис. 4.3) час запізнювання останніх точок значно менший (15-20 мс і 19-22 мс). Виміри в них у даному випадку виконали при досить невеликому напрацюванні шпинделів – лише 12 діб.

Другий приклад полягає в наступному. Передбачається, що в розглянутій кліті вимірювання зі статистичною обробкою та визначенням середнього значення проводяться періодично з деяким інтервалом ΔT . Припустимо, що за показни-

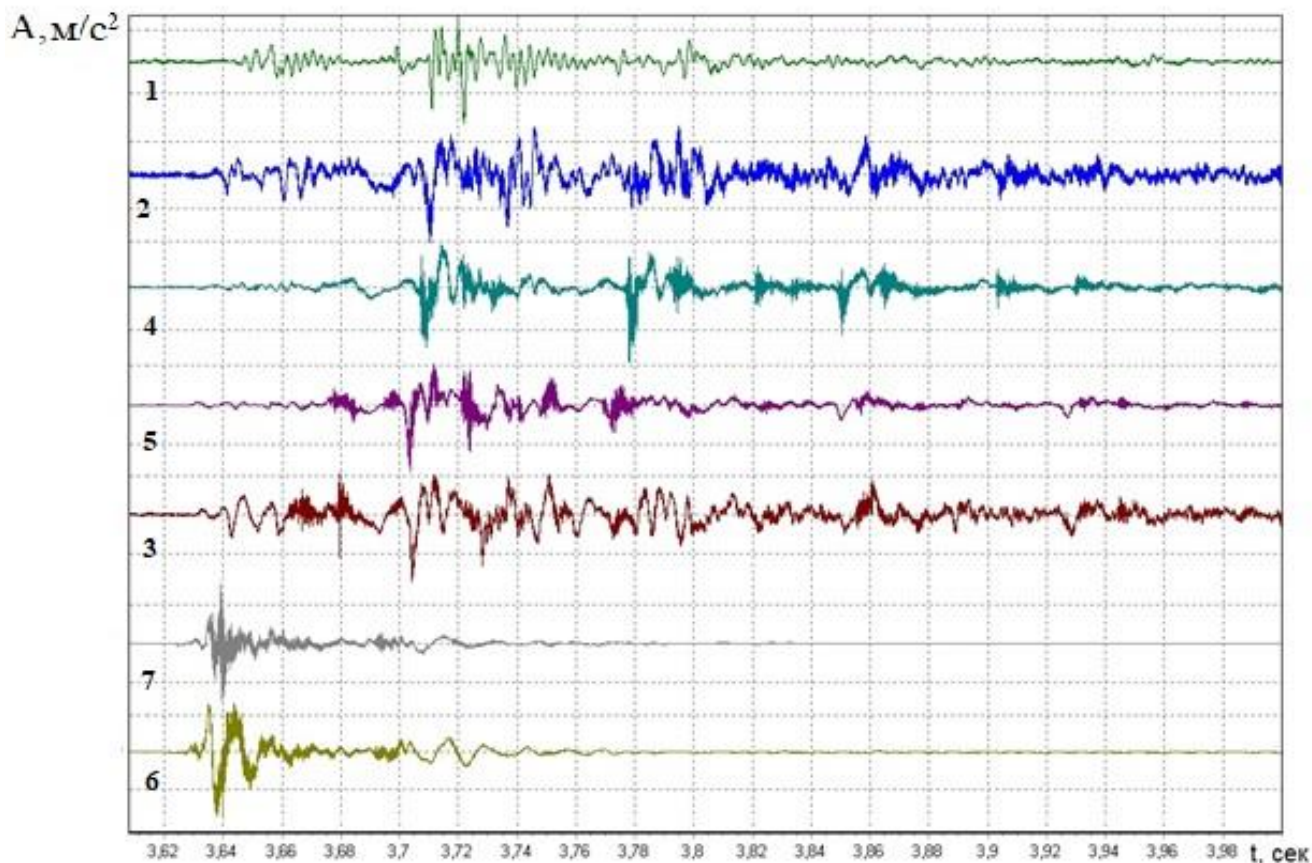


Рисунок 4.1 – Вібрація в точках контролю 1 - 7 лінії кліті № 5.

Стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь».

ками датчика, встановленого на корпусі шестеренній кліті (т.7) виявлена тенденція збільшення часу запізнювання реакції шпиндельної ділянки. На перший погляд це може бути пояснене зносом бронзових вкладишів шпинделя. Однак під час чергових вимірювань встановлено помітне (на 30% та більше) збільшення цього часу. Знос бронзових вкладишів переважно відбувається рівномірно. При їх поломці змінюється вібраційний процес під час холостого ходу та прокатки, що не спостерігалось. У той же час слід зазначити, що датчик т.7 реагує також на стан частини шестеренної кліті з боку робочих валків. Збільшення часу τ_7 може статися через зношування підшипників, ослаблення кріплення кришки або фундаментних болтів. Ці збурення відображаються також на вібрації в т.6. Тому необхідно виконати аналіз тенденції зміни часу τ_7 спільно з τ_6 та порівняти види перехід-

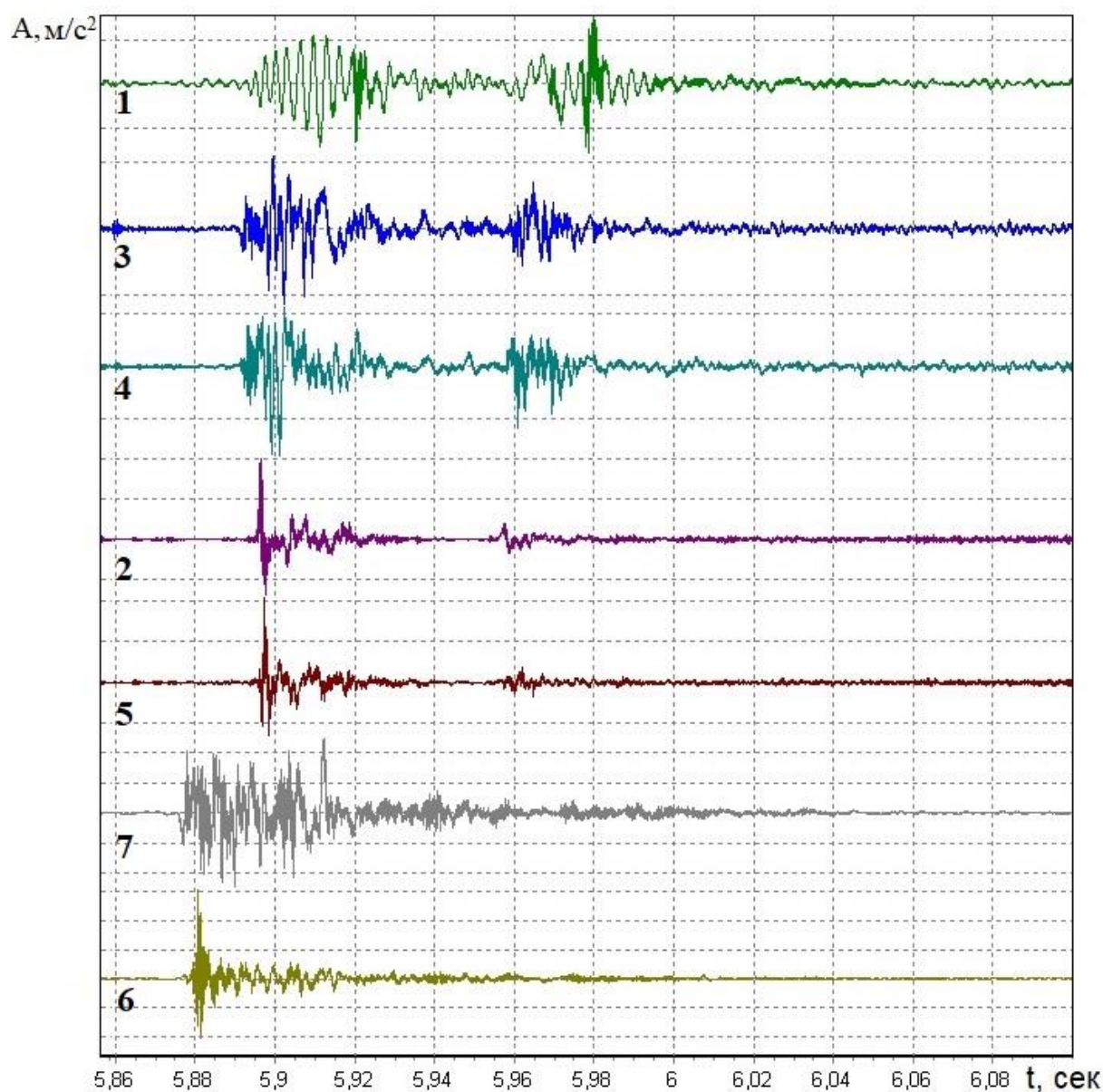


Рисунок 4.2 – Вібрація на опорах кліті № 8 при захопленні смуги.

Стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь».

ного процесу. При цьому до уваги беруться дати та обсяг останніх ремонтних впливів в шестеренній кліті і шпинделях. Так, в кліті № 8 спостерігаються незатухаючі коливання в той час, як в т.6 коливання відносно швидко затухають. Реакція т.6 запізнюється відносно т.7 на 4 мс. Пояснення цього можливо надати лише при умові виконання та аналізу послідовних вимірювань. Але і в цьому випадку виникає припущення: має місце ослаблення болтів кріплення кришки шестеренної кліті збоку шпинделів. Внаслідок цього спостерігаються високочастотні коливання.

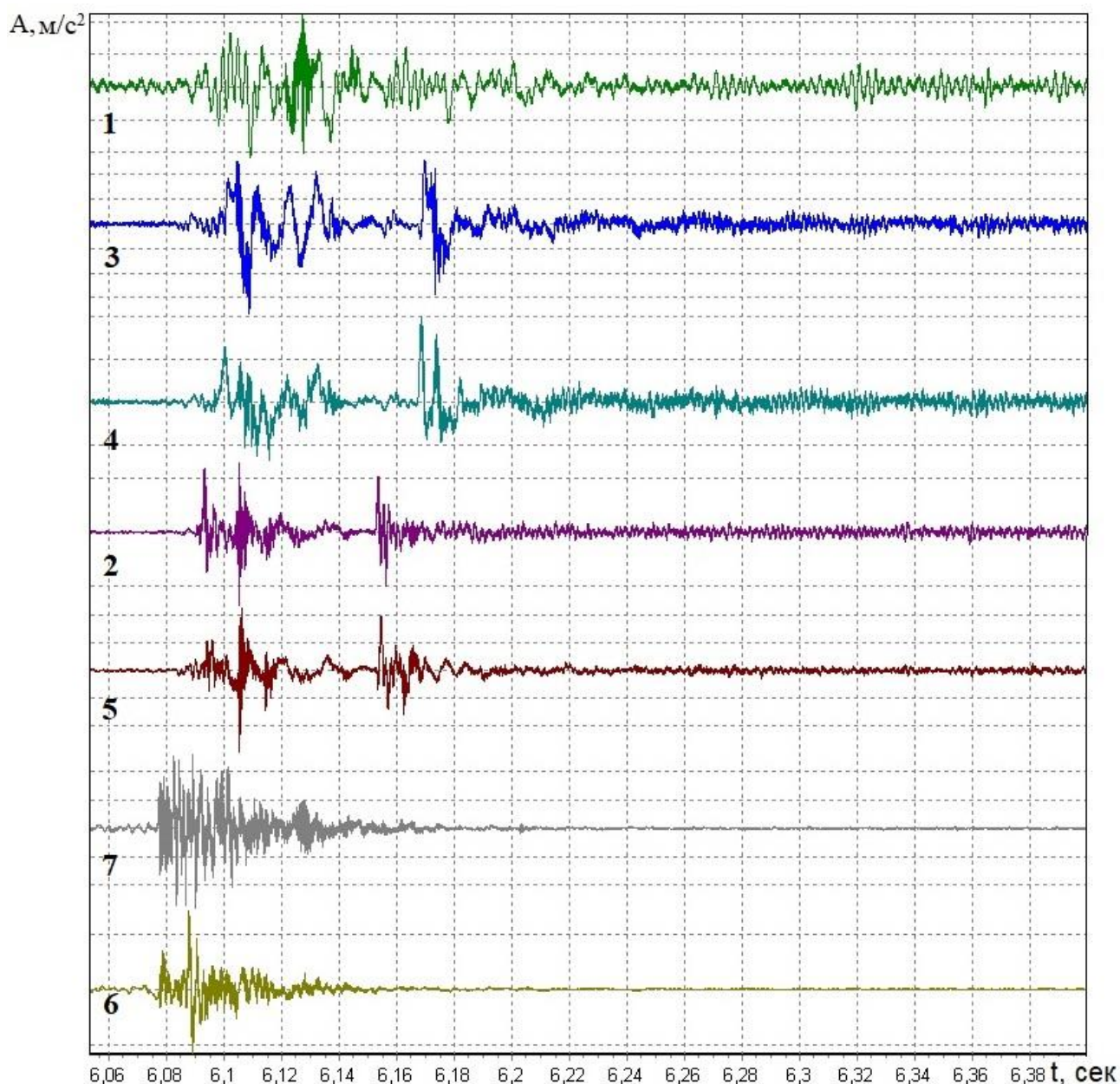


Рисунок 4.3 – Вібрація на опорах кліті № 9 при захопленні смуги.

Стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь».

Подібні коливання (хаотичного вигляду) маємо в т.7 і т.6 в клітках № 9 (рис. 4.3) і № 10 (рис. 4.4). Тому коливання в т.6 та т.7, подібні в кліті № 7, прийняли, як зразкові (рис.3.14). Їх частота становить ~ 145 Гц. Частота коливань в т.6 кліті № 8 (300 Гц) вдвічі більша ніж в кліті № 7, подібні розходження при логістичному аналізі також необхідно приймати до уваги.

На практиці вимірювань спостерігалися випадки, коли в т.4 вібродатчик реагував на 4...6 мс раніше, ніж в т.5. Це може відбуватися при збільшеному зносі

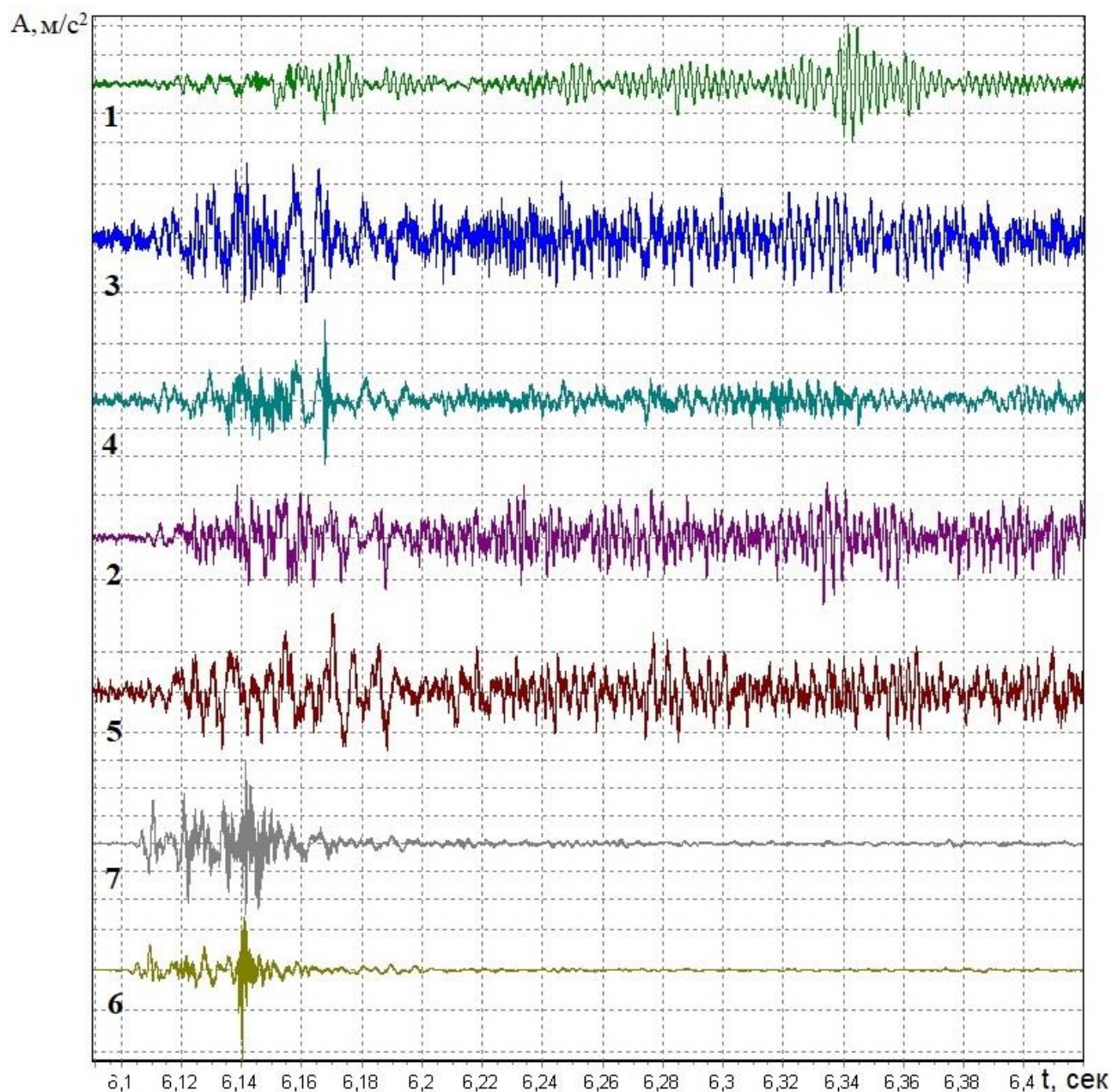


Рисунок 4.4 – Вібрація на опорах кліті № 10 при захопленні смуги.

Стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь».

підшипника на вільному кінці валу тихохідного колеса редуктора. При ударному навантаженні зубчастого зачеплення масивна муфта (~ 10 т) діаметром 1500 мм «притримує» початок руху валу колеса в підшипнику з боку шестеренної кліті, тобто т.5. Якщо в підшипнику (т.4) з'явився знос, то в цій точці зазор вибереться швидше, ніж в т.5. Фіксація таких станів вельми важлива, тому що відбувається небажаний короткочасний ударний перекіс не тільки зубів в зачепленні, але й пі-

дшипників тихохідного валу. Тут також слід брати до уваги терміни ремонтів та час напрацювання даних вузлів.

Уважне ставлення до амплітуди (розмаху) та частоти коливань разом із знаннями наведеними в розділі 2 дає можливість визначити можливі моменти. Так, в клітках № 7, № 8 і № 9 спостерігаємо два послідовні викиди розмаху вібрації. Період між ними дорівнює $0,06...0,065$ с, що співпадає з періодом пружних крутильних коливань моменту в лініях приводу цих клітей (частота $15...17$ Гц). Таким чином опосередковано через подібні викиди не проводячи складних вимірювань крутильного моменту встановлюємо частоту вільних крутильних коливань, що важливо в тих випадках, коли експериментальні підходи роблять вперше на новому (незнайомому) обладнанні. Як показано в розділі 2 подібні явища мають місце в тих випадках, коли при захопленні смуги пружний момент після першого піка досягає 0 (рис. 2.10) з розкриттям зазорів на моторній ділянці. Тому поява двох чи більше викидів вібрації свідчить про погіршення стану цієї ділянки і це явище необхідно використовувати в діагностичних цілях.

Одночасно звернемо увагу на те, що на шестеренній кліті (т.7 і т.6) подібні викиди відсутні. Тобто знос та зазори на ділянці редуктор - двигун не діють на попередню (шпиндельну) ділянку.

Також виділимо кліть № 10 (рис. 4.4). Аналіз віброграм показав, що тут час запізнення реакції точок обладнання встановити важче. Багато в чому це пояснюється тим, що передня кромка смуги доходячи до цієї кліті має в плані не рівну форму («язик») внаслідок чого час остаточного захоплення смуги «розмивається», що відображається на перехідному процесі. Але в зв'язку з найбільшою швидкістю прокатки в цій кліті амплітуда вібрації в усіх точках значна.

Для розглянутих вище та інших подібних випадків розроблений логістичний алгоритм визначення ТС вузлів.

Йдеться про те, що в кожній конкретній кліті здійснюється вимір 7-8 вібропараметрів в холостому, перехідному та сталому режимах прокатки. Якщо врахувати, що вимірюється віброприскорення та віброшвидкість, то виходить до 14-16 вібропараметрів для трьох режимів. В результаті формується значний масив вимі-

рювань. З нього в свою чергу шляхом обробки отримують 6-7 значень часу запізнювання реакції та 7-8 значень максимальних розмахів амплітуди вібрації під час захоплення смуги валками. Крім цього для стаціонарного режиму роботи визначають, наприклад, значення пік-фактору в точках 7-8, дисперсії, спектрів та ін. Подібний масив даних натурних вимірювань має виняткову інформативність про стан вузлів устаткування. Завдання полягає в тому, щоб шляхом логічних операцій проаналізувати взаємозв'язок між параметрами та їх показниками, починаючи з підозрюваного вузла.

Логістичний алгоритм складається з ряду конкретних логічних ланцюжків дій. Наприклад, якщо в т.7 час запізнювання збільшився непропорційно часу на працювання шестеренної кліті, слід визначити час $T_{ш}$ на працювання шпинделів. Якщо $T_{ш}$ менше 10...15 діб, слід визначити дату останніх ремонтних впливів в шестеренній кліті, час на працювання підшипників та т.п. При цьому велике значення має порівняння виду перехідних процесів при поточному стані з еталонним (зразковим), коли стан обладнання був найкращим.

Комплекс зазначених логістичних дій в результаті дозволяє прийти до правильних висновків щодо технічного стану вузла. Він також спрямований на розвиток курсу діагностики, заснованого на застосуванні параметрів перехідних процесів в різних ділянках лінії приводу й часу запізнювання їх реакції на ударне навантаження.

На даному етапі роботи (та впровадження системи) розроблена логістика діагностування по ділянках лінії приводу, призначена для обслуговуючого систему персоналу діагностів та передана в цех гарячої прокатки тонкого листа (ЦГПТЛ) ПрАТ «Запоріжсталь» для використання в роботі.

4.3. Діагностування по швидкості розповсюдження ударної хвилі (імпульсу)

Як відзначалося в розділі 3 швидкість розповсюдження ударної хвилі від прокатної кліті до двигуна між ділянками пов'язана з ТС обладнання. Ці обставини пропонується використати в якості способу діагностування [93]. Особливо яскраво це помітно в кліті ДУО з двома технологіями прокатки слябів – одинарної та подвійної довжини. Різниця в швидкості відрізнялася майже вдвічі (див. табл. 3.4). Розглянемо кліті № 5 і № 6. Відстань між датчиками у них однакова. При погіршеному стані обладнання запізнення реакції т.2 редуктора кліті № 5 відносно т.7 шестеренної кліті склало $\tau_{2-7} = 0,078$ с. Швидкість проходження ударною хвилею відстані 6,9 м становить $V_{2-7} = 87$ м/с. При покращеному стані $\tau_{2-7} = 0,065$ с, а $V_{2-7} = 106$ м/с. При кращому стані обладнання кліті № 6 та $\tau_{2-7} = 0,057$ с, $V_{2-7} = 121$ м/с. Тобто вказана швидкість чутлива до ТС.

Значення швидкості розповсюдження ударної хвилі взагалі і особливо в середніх ділянках лінії одержано вперше. Необхідно відзначити, що силовий потік йде через зубчасті зчеплення колеса та шестерні редуктора. В кліті ДУО, наприклад, після першого редуктора силова лінія (пружне закручування) йде через проміжний вал, потім знову через зубчасте зчеплення другого редуктора. В певній мірі на швидкість впливають знос та зазори в підшипникових опорах.

Зазначені обставини і міркування дають впевненість в значній можливій діагностичній інформативності швидкості розповсюдження ударної хвилі (крутного моменту) як від прокатної кліті до двигуна загалом, так і в середніх ділянках лінії приводу.

На цих підставах запропоновано спосіб діагностування ТС лінії приводу прокатної кліті за швидкістю розповсюдження ударної хвилі. Він складається з наступних дій.

1. Виконують вимір часу запізнення т.1, т.2 відносно корпусу прокатної або шестеренної кліті за даними вібрації.

2. З урахуванням відстаней між датчиками визначають швидкість проходження хвилею t_1 , t_2 .

3. Порівнюють одержані швидкості з базовою $V_0 = 3200$ м/с.

4. Періодично повторюють вимірювання та дії по пунктах 2, 3, встановлюють тенденцію змін швидкості в t_1 , t_2 , ... і визначають ТС ділянок лінії.

Запропонований спосіб представляє собою доповнення способу діагностування по часу запізнення. Але його перевага в тому, що коли взагалі вперше виконують виміри, то «ідеальний», найменший час запізнення невідомий, в той час як для швидкості маєтся опорне значення 3200 м/с для порівняння, наприклад, за допомогою коефіцієнта K .

Необхідно зазначити, що взагалі знання швидкості ударного імпульсу та особливостей його розповсюдження має загальне пізнавальне значення для вивчення цього процесу (явища).

4.4. Визначення технічного стану лінії приводу в клітях з багатонитковою прокаткою

У безперервних дрібносортих станах в декількох клітях ведеться прокатка в 2 або 4 нитки. Послідовність завдання смуги в калібри валків не регламентована. Один з чотирьох калібрів може заповнюватися смугою, інший калібр звільнятися від смуги, в той час як в двох інших ведеться прокатка. У підсумку в лініях приводу валків формуються різні режими навантаження, розвантаження і види перехідних процесів. Істотний вплив при цьому на ударні навантаження і коливальні явища надають знос сполучень та утворювані зазори [91, 94]. Розмикання та замикання зазорів має специфічний характер і недостатньо досліджено. Крім того, на прокатних станах відсутні надійні вимірники, що дозволяють під час роботи визначати стан зчленувань.

У зв'язку з цим доцільно на конкретних прикладах розглянути особливості динамічних процесів в деяких клітках з багатонитковою прокаткою в їх зв'язку з зазорами та встановити діагностичну цінність подібної інформації [95, 96].

Розглянемо результати вимірювань крутного моменту, виконаних на проміжному валу між двигуном та редуктором трьох клітей двохниткового дрібносортового стану 250. Крутний момент від тихохідного валу редуктора передається через шестеренну кліть і шпинделі робочим валкам.

Типовий вид перехідних процесів в лініях приводу трьох клітей № 5, № 6, № 7 при захопленні першої смуги (нитки) в одному з калібрів та захопленні другої смуги в іншому калібрі в той час, коли прокочується перша смуга, представлений на (рис. 4.5).

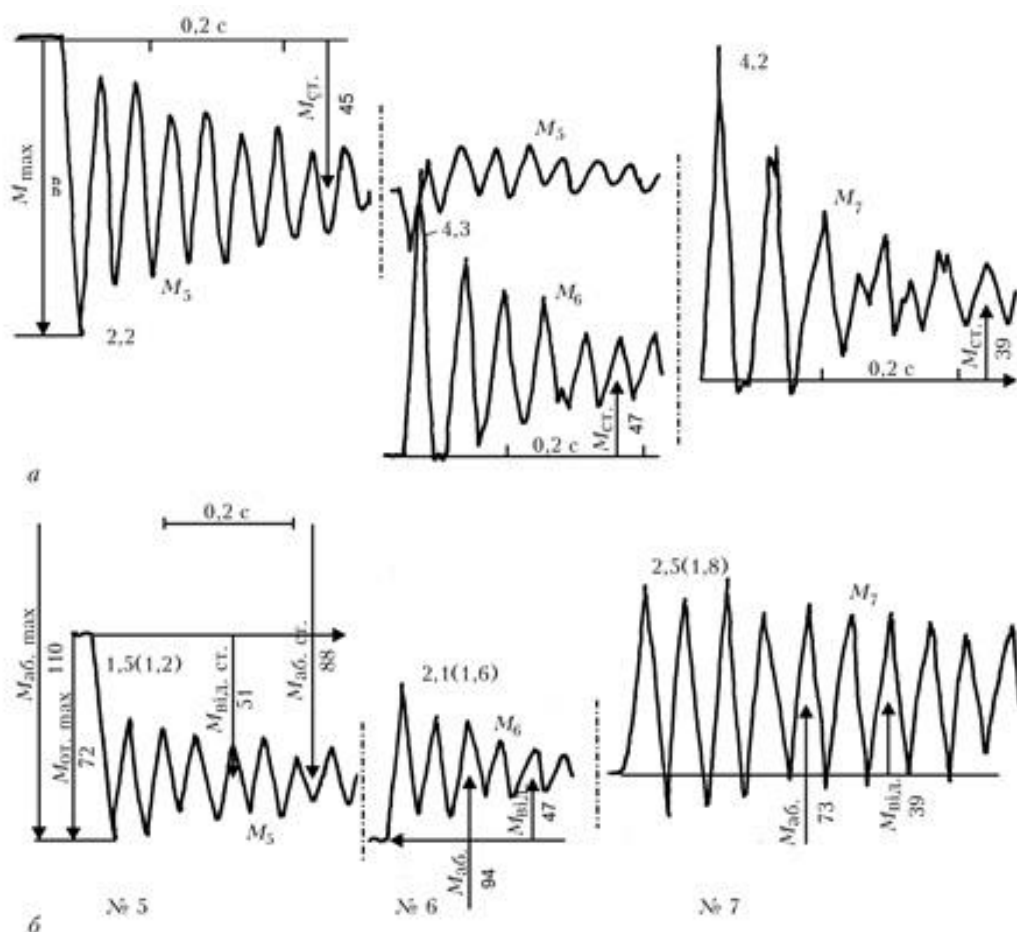


Рисунок 4.5 – Моменти сил пружності (кН·м) в головних лініях клітей № 5, № 6, № 7 стану 250 при послідовному захваті першої (а) та другої (б) полоси з показниками коефіцієнтів динамічності

При захопленні першої смуги після першого піку в клітках № 6 і № 7 момент зменшується до нуля. Це означає, що відбувається короткочасне розмикання зазорів в зубчастих зачепленнях на ділянці редуктор - двигун. Досвід вимірювань показує, що після ремонту устаткування, зазначене явище не настає.

Важливою характеристикою перехідного процесу є коефіцієнт динамічності K – відношення максимального пікового моменту $M_{\max}$ до моменту $M_{\text{ст}}$ в сталому режимі прокатки:

$$K = M_{\max} / M_{\text{ст}} . \quad (4.1)$$

Наявністю зазорів пояснюються істотні значення коефіцієнта динамічності в клітках № 6 та № 7 – $K_6 = 4,3$; $K_7 = 4,2$ на відміну від кліті № 5, де $K_5 = 2,2$ і розмикання зазорів не спостерігається. Частота коливань моменту в клітках становить ~ 20 Гц, отже, динамічні властивості ліній приводу валків клітей близькі. Тому менше значення K_5 можна пояснити кращим ТС лінії цієї кліті.

Захоплення смуги валками клітей № 5, № 6, № 7 під час прокатки другої смуги також супроводжується коливаннями моменту з тією ж частотою. Однак коефіцієнт динамічності в клітках істотно зменшився (табл. 4.1). Це пояснюється тим, що кутові зазори в зчленуваннях лінії знаходяться в замкнутому стані, тому вони не впливають на максимальне пікове навантаження.

Дану особливість можна використовувати для оцінки впливу зазорів на $M_{\max}$, а також з метою діагностики зносу та зазорів.

Якщо визначення коефіцієнта динамічності при захопленні першої смуги односторонньо, то для наступних смуг він може бути визначений двозначно.

1. До уваги береться абсолютне значення навантаження:

$$K_{\text{аб}} = M_{\text{аб. max}} / M_{\text{аб. ст}} . \quad (4.2)$$

Таблиця 4.1 – Значення коефіцієнтів динамічності в клітках №№ 5, № 6, № 7 при захопленні першої смуги K_1 і другої смуги (абсолютне $K_{аб}$ та відносне $K_{от}$) під час прокатки першої смуги

№ клі- ті	Коефіцієнт динамічності		
	Перша полоса	Друга полоса	
	K_1	$K_{аб}$	$K_{от}$
5	2,2	1,2	1,5
6	4,3	1,6	2,4
7	4,2	1,8	2,5

Для кліті № 6 під час захоплення другої смуги $K_{аб. 6} = 1,6$ для кліті № 7 $K_{аб. 7} = 1,8$.

2. Враховується відносне значення навантаження:

$$K_{от} = M_{от. max} / M_{от. ст} \cdot \quad (4.3)$$

Для другої смуги (табл. 4.1) $K_{от. 6} = 2,4$ $K_{от. 7} = 2,5$. Як бачимо, різниця в значеннях коефіцієнтів істотна. Тому виникає необхідність визначитися, в яких випадках і де слід застосовувати зазначені значення коефіцієнта K та в чому їх інформативність.

Якщо мова йде про динаміку перехідного процесу, то динамічність лінії приводу слід характеризувати відносним коефіцієнтом $K_{от}$. У такому випадку при розрахунку максимального навантаження додатково враховують складову статичного навантаження, обумовлену моментом «зайнятого» металом калібру:

$$M_{max} = K_{от} \cdot M_{от. ст} + M_{ст} \cdot \quad (4.4)$$

При захопленні наступної смуги, коливання моменту відбуваються відносно нового значення статичного навантаження.

Коефіцієнт $K_{от}$ залежить від динамічних властивостей лінії приводу, в той час як коефіцієнт $K_{аб}$ залежить від абсолютного навантаження: чим останнє більше (для даної системи), тим він менше. Отже, для визначення

$$M_{аб. max} = K_{аб} \cdot M_{от. ст} \quad (4.5)$$

необхідно знати зазначену залежність. У цьому полягає незручність його застосування. На відносну динамічну складову навантаження і $K_{от}$ при захопленні першої смуги, як зазначалося, впливають знос та породжувані їм кутові зазори в зчленуваннях. При захопленні другої смуги цей вплив відсутній, оскільки зазори замкнуті. Тому користуючись коефіцієнтом $K_{от}$ можна оцінити вплив зазорів. З виразу для $K_{от}$ легко отримати відносну динамічну складову моменту сил пружності

$$\delta M_{д} = \Delta M_{д. max} / M_{от. ст} = K_{от} - 1. \quad (4.6)$$

Для першої смуги згідно з таблицею в кліті № 6 $\delta M'_{д 6} = 3,3$, для другої $\delta M''_{д 6} = 1,4$. Ставлення відношення $n_6 = \delta M'_{д 6} / \delta M''_{д 6} = 2,4$ показує, у скільки разів збільшується відносна динамічна складова через вплив зазорів в кліті № 6. Аналогічно для кліті № 7 $n_7 = 2,1$. Скористатися значенням $K_{аб}$ для цих цілей не представляється можливим. Якщо періодично вимірювати момент в суміжних клітках при захопленні першої смуги (нитки) в одному з калібрів, а потім другої смуги в іншому калібрі в той час, коли перша смуга прокочується, то за значенням коефіцієнта n можна відстежувати розвиток зносу та зазорів в з'єднаннях й приходити до певних діагностичних висновків щодо зміни ТС ліній головного приводу в клітках з двох та чотирьохнитковою прокаткою.

Виконуючи періодичні вимірювання моменту сил пружності на ділянці двигун - редуктор та, визначаючи значення коефіцієнта динамічності при захопленні

першої смуги і потім другий та порівнюючи їх між собою, встановлюють фактичний стан зносу і зазору. При цьому на початковому етапі використовується розрахункова залежність $K(\delta)$, представлена на (рис. 4.6).

Більш ефективним є вимірювання часу запізнювання реакції ділянок за показаннями вібродатчиків, встановлених уздовж лінії приводу на корпусному обладнанні. Природно, що вимірювання виконуються при захопленні першої та другої смуги. На (рис. 4.6, б) показана розрахункова залежність часу запізнювання в т.1 $\tau(\delta)$. Пунктирні прямі означають час природного запізнювання ділянки при прокатці другої смуги. Залежності $\tau_i(\delta)$ для i -х ділянок також спочатку використовуються в якості опорних (еталонних). Потім вони уточнюються за результатами періодичних вимірювань.

На даний спосіб діагностування подана заявка на винахід [97].

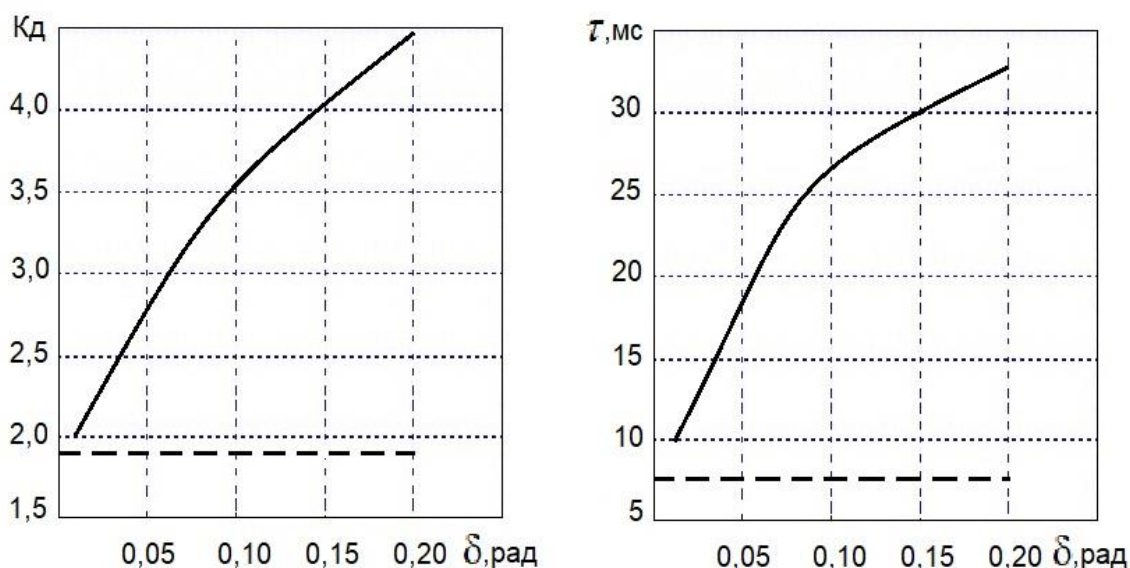


Рисунок 4.6 – Залежність коефіцієнта динамічності та часу запізнювання на моторному валу від зазору в шпіндельному зчленуванні:
пунктир – відсутність зазору

4.5 Діагностування при викиді хвостової ділянки смуги з валків

В параграфі 2.1 надано опис крутильних ударів в лінії приводу прокатної кліти при виході з валків задньої ділянки смуги. Висловлено припущення, що періоди T_1 , T_2 та T_3 пов'язані з ТС ділянки редуктор - двигун. Той факт, що під час захоплення смуги валками також утворюються зворотні крутильні удари з короткими нульовими ділянками крутного моменту, вказує на розмикання силового зв'язку між зубцями вал - шестерні та проміжного колеса, наприклад, в двохступеневому або тихохідного колеса в одноступеневому редукторі.

Розглянемо роботу зачеплення при викиді хвостової ділянки з валків. Будемо мати на увазі, що під час прокатки проміжний вал навантажений крутним моментом M , рівним моменту двигуна (або прокатки, віднесеного до валу). Кут пружної деформації валопроводу становить

$$\varphi_{\text{CT}} = M/C_{\text{B}}, \quad (4.7)$$

де, C_{B} – жорсткість валопроводу між редуктором та двигуном.

Для кліти № 5 стану 1700 при $M=100 \text{ кН} \cdot \text{м}$ та $C_{\text{B}}=17480 \text{ кН} \cdot \text{м/рад}$ кут статичного пружного закручування валу становить $\varphi_{\text{CT}}=0,00572 \text{ рад}$ або $\varphi_{\text{CT}}=0,33^\circ$. Час T_2 на (рис. 2.14) в середньому дорівнює $0,25 \text{ с}$, тоді швидкість пружного розкручування валопроводу (звільнення від потенційної енергії) дорівнює: $\dot{\varphi}_{\text{упр}} = 0,00572/0,25=0,023 \text{ 1/с}$. Це відносна швидкість руху зубів вал - шестерні в полі люфту $\delta_{\text{л}}$, утвореного зносом зубів.

Схематично ці рухи та удари представлені на (рис. 4.7).

1. Під час прокатки зуби робочої стороною передають крутний момент. Лінійна швидкість шестерні та колеса рівні $R \cdot \omega_1 = r \cdot \omega_2$, причому ω_1 та ω_2 мають деяке постійне значення. Люфт знаходиться з тильного боку зубів (рис. 4.7, а, г).

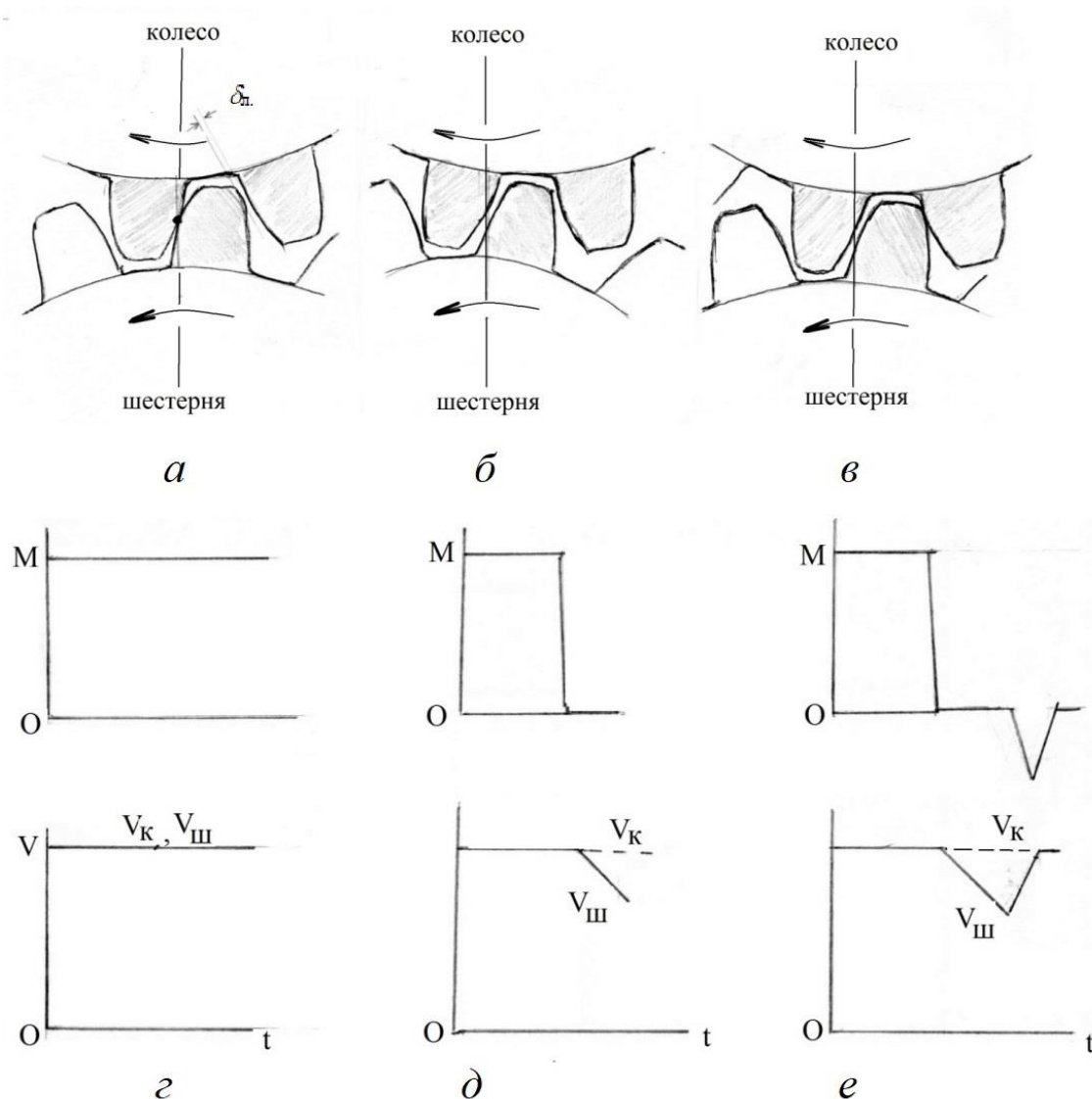


Рисунок 4.7 – Схема послідовних ударів в зачепленні вал – шестерні та колеса редуктора під час викиду смуги з валків:

M – момент сил пружності, V_K та $V_{Ш}$ – окружна швидкість колеса та шестерні

2. Після скидання навантаження, тобто моменту M контакт зубів порушується. Колесо редуктора продовжує обертатися за інерцією практично з тією ж швидкістю. Швидкість вал - шестерні зменшується за рахунок складової пружної розкручування валопроводу, яка дорівнює $-\phi_{упр}$. Контакт з робочою лінією зубів порушується, починає розмикатися кутовий зазор. Протягом часу T_1 , поки не вибереться весь люфт δ_n , зуби не перебувають в зачепленні, крутний момент на валопроводи дорівнює нулю (рис. 4.7, б, д).

3. В результаті відносного зустрічного руху після вибору люфту відбувається перший удар між зубами тильною стороною. Люфт утворюється між робочими площинами зубів, як би «переходячи» на іншу сторону (рис. 4.7, в, е).

4. Ділянка двигун - редуктор, як парціальна система, володіє частотою власних коливань 13,8 Гц з періодом 0,072 с. Тому після удару тильною стороною вал-шестерня за рахунок пружного закручування валопроводу набуває додаткову відносну складову швидкості $+\dot{\phi}_{упр}$ при русі колеса з великим моментом інерції в колишньому напрямі. Контакт зубів тильною стороною порушується, тому що зуби вал-шестерні обганяють зуби колеса. Відбувається як би повторення події по п.2. Люфт між робочими поверхнями починає замикатися.

5. Зубці вал-шестерні «наздоганяють» зуби колеса, яке до того уповільнює свою швидкість (відсутні рушійні сили). У той же час на шестерню діє момент холостого ходу двигуна. Люфт вибирається, відбувається другий удар робочими поверхнями зубців.

6. З огляду на інерційність лінії приводу і коливальних властивостей парціальної системи відбувається повтор прямих та зворотних ударів з згасанням процесу, тобто розсіюванням енергії пружних коливань.

З метою встановлення закономірностей виконали комп'ютерне моделювання виходу смуги з валків, тобто скидання навантаження, на прикладі тримасової рядної системи (рис. 4.8).

У результаті моделювання встановлено наступне.

1. Чим більше зазор, тим більше часу потрібно для його замикання.
2. Чим більше зазор, тим більше періоди T_1 , T_2 , T_3 .
3. Чим більше крутний момент, тим більше кут пружного закручування валопроводу, тим з більшою швидкістю відбувається його зворотна скрутка і швидше замикається зазор.

На (рис. 4.9) приведена розрахункова залежність періодів T_1 , T_2 та їх суми від кутового зазору.

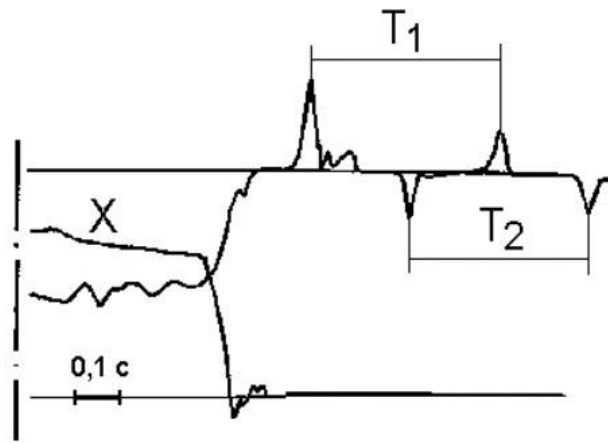


Рисунок 4.8 – Перехідний процес в лінії приводу валків на проміжному валу між двигуном та редуктором (момент M сил пружності) і в пружній системі кліті (деформація X стійки станини) після викиду смуги з валків

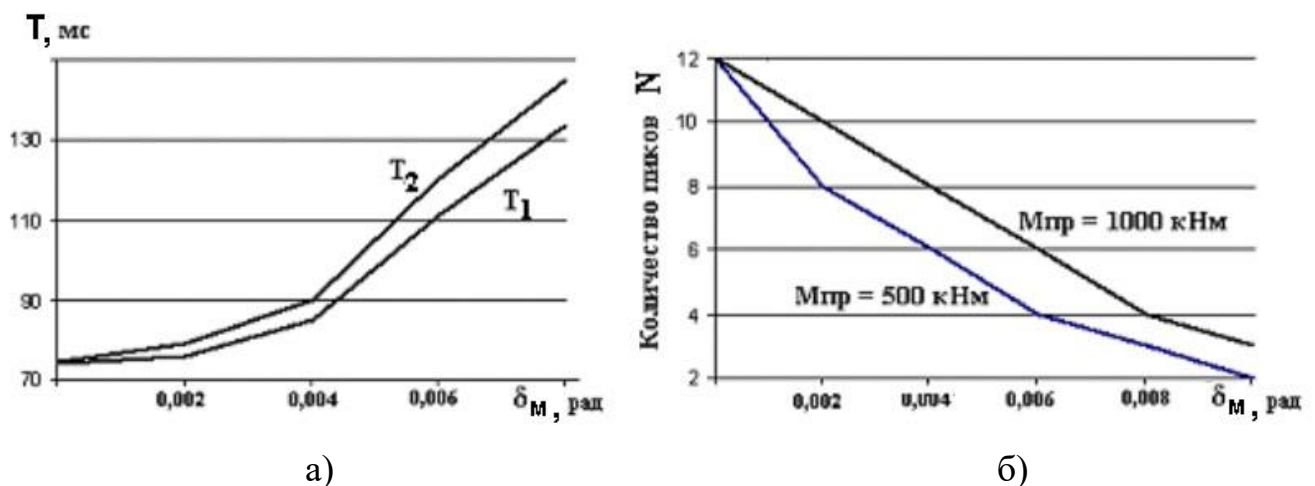


Рисунок 4.9 – Залежність періодів T_1 , T_2 та кількості N піків моменту після викиду смуги від кутового зазору δ_m на ділянці двигун-редуктор.

Як бачимо, є всі підстави прийняти суму перших двох періодів в якості діагностичної ознаки, пов'язаної зі зносом та зазором в зубчастому зачепленні. Слід зазначити, що значення розрахункових періодів виявилось менше фактичних. Однак фактичний знос в кліті № 5 стану 1700 ПрАТ «ММК ім. Ілліча» під час вимірювань залишився невідомим через відсутність можливості його вимірювання.

Шляхом моделювання отримали інший цікавий результат. Чим менше зазор, тим більше піків прямих та зворотних ударів. Однак увагу викликає те, що при ві-

дсутності зазору момент сил пружності при скиданні навантаження коливається навколо нульової лінії з такою ж частотою, що і при захопленні смуги, з максимальною амплітудою сумірною зі статичним навантаженням. Натурні вимірювання дають інший результат. Однак як тільки з'являється мінімальний зазор, перехідний процес відповідає фактичному.

Встановлено, що зі збільшенням зазору кількість піків прямих та зворотних ударів зменшується (рис. 4.9, б), що дає підставу прийняти кількість ударів в якості додаткової діагностичної ознаки.

За результатами натурних вимірювань та моделювання розроблений спосіб діагностування стану ділянки редуктор - двигун, подана заявка на винахід.

Суть методу полягає в наступному.

На першому етапі для лінії приводу кліті шляхом моделювання будують залежності згідно (рис. 4.9). Вони слугують в якості базових (опорних). Потім періодично виконують вимірювання моменту сил пружності на проміжному валу або вібрації корпусу редуктора при викиді смуги з валків. За даними вимірів визначають сумарний час T_3 періодів перших трьох зворотних ударів та за допомогою залежності $\delta(T_3)$ фактичне значення зазору δ_ϕ .

4.6. Діагностування шляхом пригальмовування швидкості обертання валків

З метою зниження впливу зазорів в шпиндельному зчленуванні на ударні навантаження при захопленні смуги валками запропоновано ряд способів вибірки зазорів. Безпосередньо перед захопленням смуги збільшують швидкість головного приводу; на валки встановлюють гальмівні пристрої; здійснюють вигин передньої ділянки смуги; збільшують зусилля розпору валків, тобто створюють гальмівний момент; відповідним чином налаштовують систему урівноваження шпинделів.

Пропозиція зводиться до того, щоб використовувати подібні рішення в діагностичних цілях. Суть полягає в наступному. При одному й тому ж ТС лінії приводу виконують серії вимірювань часу запізнювання реакції ділянок без вибірки зазорів, а потім з вибіркою зазорів.

У зв'язку з цим стосовно чорнових клітей БШШС додатково запропоновані наступні способи пригальмовування валків.

1. Здійснювати перекус передньої кромки смуги й в такому вигляді задавати в валки (рис.4.10). В цьому випадку смуга в точках А і В торкається бочки валків, та між смугою і валками створюється тертя, що сприяє гальмуванню швидкості валків. Додатково діє момент та зусилля на валки, спрямовані на вирівнювання перекосу смуги. Оцінимо кути перекосу за умовою захоплення смуги на прикладі чорнової кліті № 4 стану 1680 ПрАТ «Запоріжсталь». Товщина смуги на вході $h = 35$ мм, обтиснення $\Delta h = 10$ мм, ширина $H = 1250$ мм, радіус робочих валків $r = 350$ мм, коефіцієнт тертя при захопленні $f = 0,13$. Кут захоплення смуги при рівній завданню смуги

$$\alpha = \sqrt{\Delta h / r} = \sqrt{10 / 350} = 0,169 \text{ рад } (9,7^\circ). \quad (4.8)$$

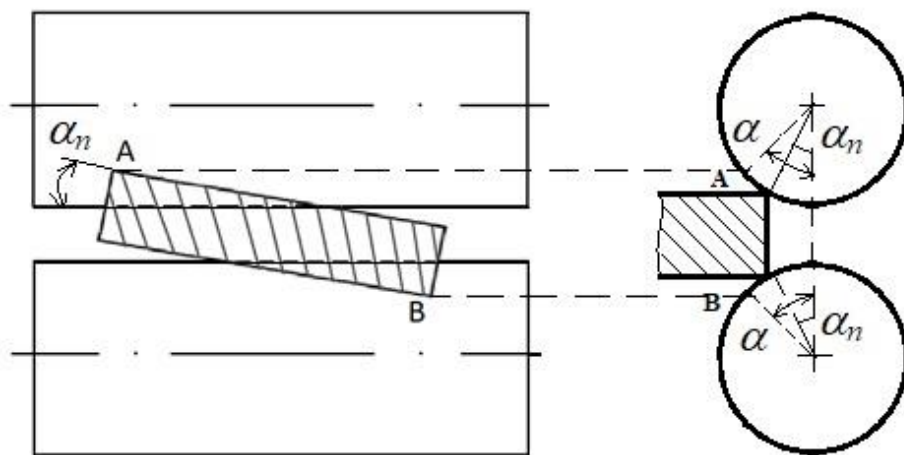


Рисунок 4.10 – До способу діагностування шляхом перекосу торця смуги перед завданням у валки

Відомо, щоб відбулося захоплення смуги валками, кут захоплення α_3 повинен бути менше кута тертя β_T : $\alpha_3 \leq \beta_T$. Для листових станів гарячої прокатки максимальний кут захоплення $\alpha_3 = 15...22^\circ$ при кутах перекосу передньої кромки $\alpha_{II} = 5...12^\circ$. Цим кутам відповідають межі дуги $l = r \cdot \alpha_{II} = 30...73$ мм уздовж якої ковзають т.А і т.В смуги по бочці валків. При швидкості прокатки в чорнових клітках $\sim 0,5$ м/с ($\omega = 1,42$ 1/с) час ковзання (гальмування валків) складе $0,06...0,15$ с. Це значення може бути збільшено за рахунок зменшення швидкості завдання смуги, шляхом регулювання швидкістю обертання вертикальних валків аж до їх зупинки на $2...5$ с в момент торкання смугою валків. Ефект гальмування валків в полі зазору від цього посилюється. Оцінки показують, що зазор в зчленуванні шпиндель - валок $\delta_{ш} = 0,0175$ (1°) замкнеться протягом часу $t_3 \approx \delta_{ш}/\omega = 0,0175/1,42 \approx 0,01$ с. Після вибірки зазору відбувається захоплення смуги, ударне навантаження в лінії та час запізнювання ділянок зменшуються. Шляхом порівняння часу τ_1 ділянок з підгальмуванням й без нього визначають стан шпиндельної ділянки.

2. Другий спосіб полягає в тому, що перед завданням смуги в валки здійснювати попередній вигин її переднього ділянки на довжині до $200...300$ мм, подібно рис. 4.11.

Смуга торкається бочки валків в т. А, т. В і т. С. За рахунок сил тертя, які збільшуються бо валки тиснуть на смугу, як і в попередньому варіанті відбувається пригальмування швидкості робочих валків, що веде до замикання зазорів.

Таким чином, застосування методу полягає в тому, щоб виконати серії вимірювань часу запізнювання ділянок лінії приводу із здійсненням вигину і без вигину, визначити середній час запізнювання ділянок в обох випадках і на підставі порівняння їх значень визначити технічний стан лінії приводу.

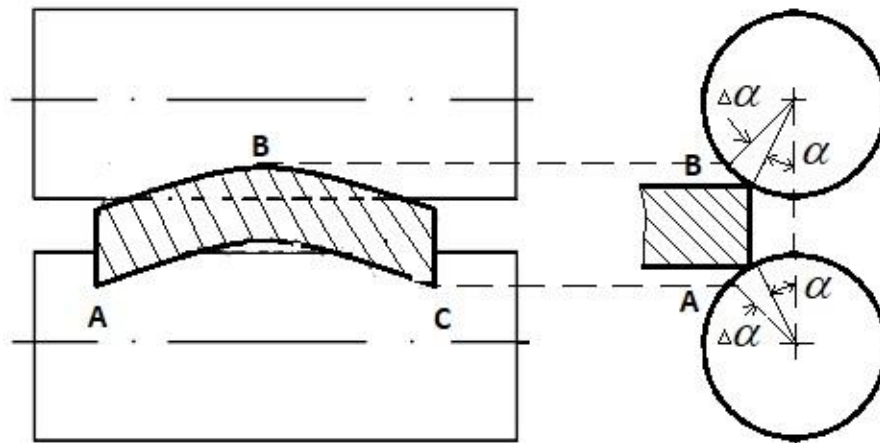


Рисунок 4.11 – До способу діагностування шляхом попереднього вигину передньої ланки смуги

4.7. Діагностування шляхом зміни швидкості валків.

В лінії головного приводу прокатки в перехідних режимах відбуваються крутильні відносні коливання зосереджених мас через їх інерційність та пружності валків.

Коливається також швидкість обертання валків. Так, на рис. 2.1. (стан 2800) амплітуда коливань робочого валка становить 23%, опорного 17%. Шляхом диференціювання записів кривих трьох моментів сил пружності, наведених на рис. 4.12, встановлений характер початкових коливань швидкості верхнього і нижнього робочого валка (по моменту на шпинделях) і редуктора (момент на ділянці редуктор-двигун).

Згідно рис. 4.13 при захопленні смуги швидкість обох робочих валків одночасно зменшується на ~13%, редуктора на ~6%. Тут спостерігається явне запізнювання реакції моменту на моторній ділянці - на ~0,044 с при часі захоплення смуги валками 0,024 с. Далі помітно, що за рахунок крутильних коливань швидкість валків збільшується на ~8%.

Як бачимо, коливання швидкості обертання робочих валків відбуваються з частотою крутильних коливань. Отже, швидкість валків може бути прийнята в

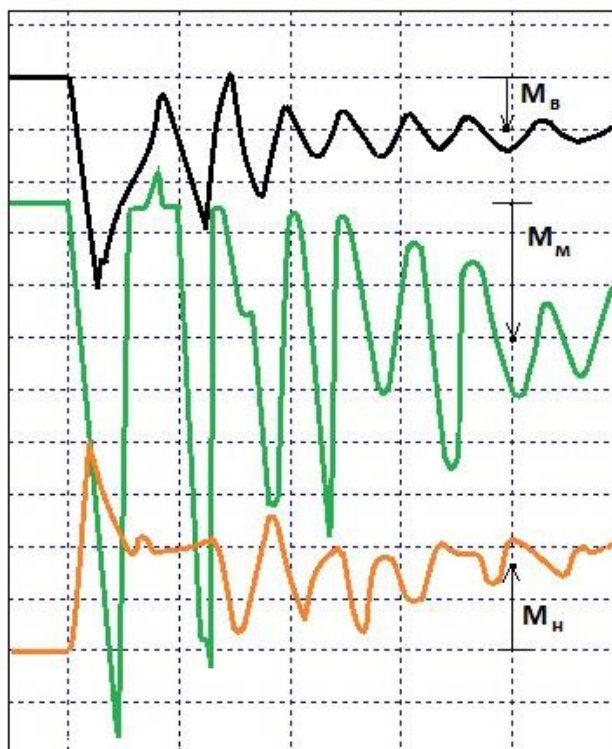


Рисунок 4.12. – Перехідний процес по моменту сил пружності на верхньому M_B , нижньому M_H шпинделі і моторному валу M_M в період захоплення смуги валками в кліті №5 стану 1700 ПАТ «АрселорМіттал Теміртау»

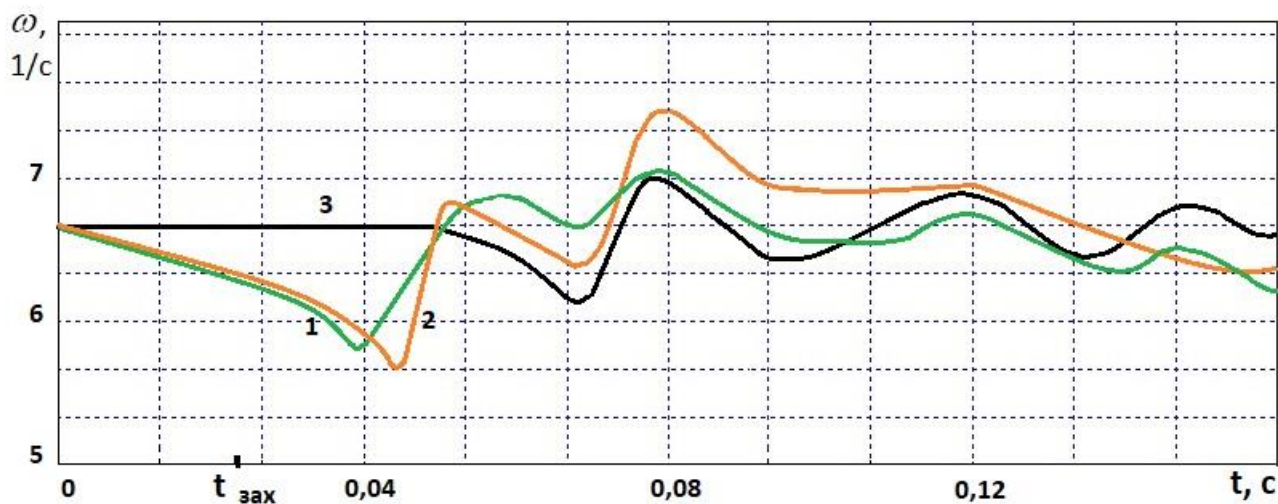


Рисунок 4.13. – Зміна кутової швидкості верхнього (1), нижнього (2) робочого валка і колеса редуктора (3) в період захоплення смуги валками; час захоплення $t_{зах} = 0,024$ с.

Кліть №5 стану 1700 ПАТ «АрселорМіттал Теміртау».

якості інформативної і потім діагностичної ознаки. Однак в такому аспекті раніше цей параметр не розглядався.

Значення фактичної частоти вільних крутильних коливань має велике практичне значення при оцінці резонансних режимів під час роботи, при визначенні циклів навантаження для розрахунків на довговічність, при розробці еквівалентних розрахункових схем ліній приводу і подальшому моделюванні діагностичних процесів. Однак до теперішнього часу штатні засоби для вимірювання крутного моменту сил пружності на прокатних станах відсутні. У зв'язку з цим пропонується здійснювати вимірювання швидкості обертання робочих валків, шестеренних валів, колеса і шестерні редуктора в діагностичних цілях.

З урахуванням викладеного запропонований спосіб діагностування, заснований на розриві контакту робочих і опорних валків та його відновленні перед захопленням смуги валками. Суть його полягає в наступному. Перед захопленням смуги валками верхній опорний валок виводять короткочасно з контакту з робочим. Після того, як швидкість опорного валка зменшиться на 60...80% аж до зупинки, його знову вводять в контакт. В цей час на робочий валок, що обертається рівномірно, починає діяти сила тертя-кочення на контакті бочок. За рахунок розгону опорного валка (передачі йому частини кінетичної енергії робочого) робочий валок гальмується в полі відкритого зазору в той час як шпindel продовжує обертання з колишньою швидкістю (від верхнього шестеренного валка). За рахунок пригальмовування робочого валка зазор в зчленуванні валок-шпindel замикається.

На рис. 4.14, а зображено положення шпинделя 1 і валка 2 в момент розімкнутого зазору δ в шпindelному зчленуванні. При торканні опорного валка 3 робочого (рис. 4.14, б) відбувається гальмування робочого валка, шпindel у відносному русі в полі зазору «доганяє» робочий валок. В результаті зазор замикається. У цей час здійснюють вібраційні вимірювання і за ними визначають час запізнювання реакції ділянок лінії приводу. Шляхом порівняння результатів вимірювання часу запізнювання, виконаних при розмиканні контакту робочого і опорного валка і без розмикання, по отриманій різниці встановлюють стан ділянок.

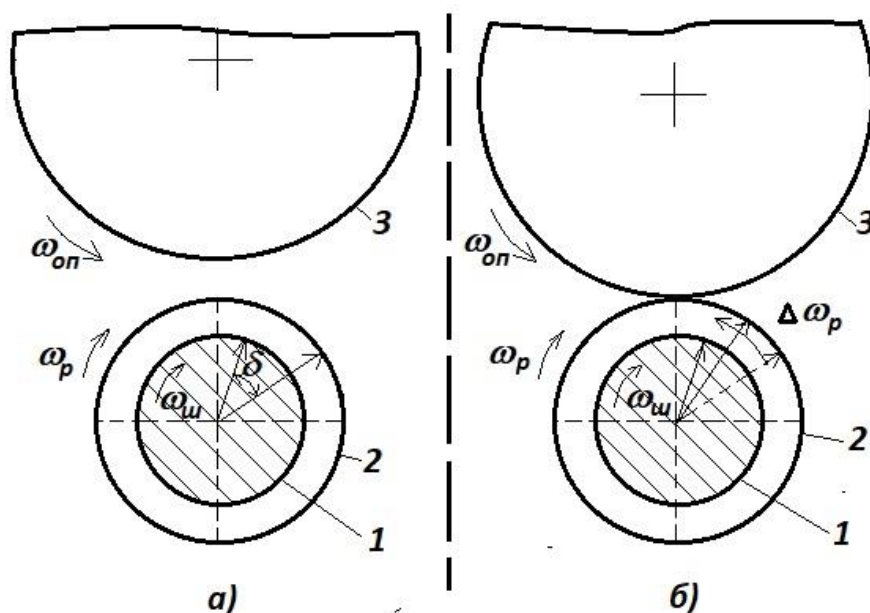


Рисунок 4.14. – Схема вибірки зазору δ в зчленуванні валок шпиндель:

а) початкова стадія при розімкненому зв'язку валків;

б) при введенні валків в контакт.

1 – шпиндель; 2 – робочий валок; 3 – опорний валок.

Вимірювання показали, що кутова швидкість опорного валка на вибігу (без контакту з робочим) зменшується на 70...80% протягом 5...8 с в залежності від кліті, тобто швидкості валків. Це менше, ніж пауза між смугами, що прокочуються.

Дамо деякі мітки при наступних початкових умовах.

1. Опорний валок в момент торкання не обертається.
2. Швидкість робочих валків початкова $\dot{\varphi}_p$.
3. Кут повороту шпинделя $\varphi_{ш}$.
4. Різниця в кутовому положенні між кутами становить зазор $\delta = \varphi_v(0) - \varphi_{ш}(0)$.

Після приєднання опорного валка (без прослизання) на робочий валок діє гальмівний момент:

$$M_T = k \cdot P \cdot r, \quad (4.9)$$

де, P – зусилля, що діє на робочий валок зі швидкістю опорного; k – коефіцієнт тертя; r – радіус робочого валка.

Прискорення гальмування робочого валка становить:

$$\ddot{\phi} = -k \cdot P \cdot r / I_{\text{пр}} = a, \quad (4.10)$$

де, $I_{\text{пр}}$ – наведені моменти інерції опорного і робочого валків:

$$I_{\text{пр}} = I_p + I_{\text{оп}} \cdot (r/R)^2. \quad (4.11)$$

З рівномірним кутовим прискоренням $\ddot{\phi} = a$ робочий валок проходить відстань $\phi_p(t)$, скорочуючи кут δ між валком і шпинделем аж до нуля. Швидкість робочого валка:

$$\phi_p = \omega = a \cdot t + \omega_{p0} \quad (4.12)$$

а час t_3 закриття зазору визначається з рішення рівняння:

$$\delta = \frac{1}{2} a \cdot t_3^2 + \omega_{p0} \cdot t_3 \quad (4.13)$$

звідки отримуємо:

$$t_3 = -\frac{\omega_{p0}}{a} \pm \sqrt{\frac{\omega_{p0}^2}{a^2} + \frac{2\delta}{a}}. \quad (4.14)$$

З урахуванням того, що прискорення a негативна величина підкореневий вираз має місце при нерівності

$$\frac{\omega_{p0}^2}{a^2} > \frac{2\delta}{a}. \quad (4.15)$$

Умова $t_3 > 0$ виконується при

$$t_3 > \frac{\omega_{p0}}{|a|} + \sqrt{\frac{\omega_{p0}^2}{a^2} + \frac{2\delta}{|a|}}. \quad (4.16)$$

Розглянемо особливості визначення часу закриття зазору. Прискорення гальмування робочого валка негативне, тому вираз для t_3 має сенс при

$$\omega_{p0}^2 > \frac{2\delta}{|a|}, \quad (4.17)$$

або

$$\omega_{p0} > \sqrt{\frac{2\delta}{|a|}}, \quad (4.18)$$

Мінімальне значення

$$\omega'_{p0} = \sqrt{\frac{2\delta}{a}}, \quad (4.19)$$

з виразу для t_3 подібне мінімальне значення дорівнює:

$$\omega''_{p0} \geq \sqrt{\frac{1 + \sqrt{2\delta \cdot a}}{a}}. \quad (4.20)$$

Для визначення допустимих реальних швидкостей робочого валка необхідне дотримання двох нерівностей (4.19) і (4.20).

Для конкретного прикладу з вагою опорного валка $P = 50000$ кг, $r = 0,3$ м, $I_{\text{пр}} = 5500$ кг·м², з зазором $\delta = 0,02$ рад отримали: $a = -0,36$ 1/с, $\omega'_{p0} = 0,33$ 1/с, $\omega''_{p0} = 2,94$ 1/с.

З двох нерівностей вибираємо більше, тобто початкова швидкість робочого валка повинна бути більше 2,94 1/с, або 1,05 м/с, що відповідає швидкості прокатки в чорнових клітях.

На рис. 4.15 наведений варіант розрахунків.

Після розмикання контакту окружна швидкість $V_{\text{оп}}$ опорного валка зменшується. В момент t_c (т. В) відбувається відновлення контакту валків: швидкість опорного валка збільшується, а робочого незначно зменшується.

Починаючи від т. С окружна швидкість на бочці обох валків збігається.

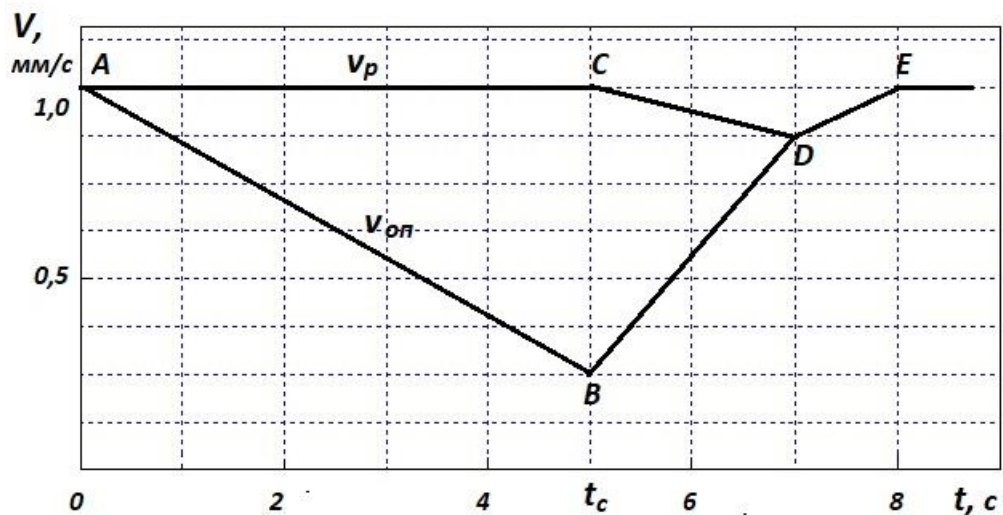


Рисунок 4.15. – Окружна швидкість бочки робочих V_p (AC) і опорних $V_{\text{оп}}$ (AB) валків після розмикання контакту і його відновлення CDE і BDE.

4.8 Допустимі значення часу запізнювання ділянок лінії приводу

З метою застосування часу запізнювання в якості діагностичної ознаки, що характеризує загальний ТС ділянок, для клітей стану 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» виконали серії вимірювань перед тим, як здійснювалася заміна шпинделів зі зношеними вкладишами [98]. Методика визначення τ полягала в обчисленні його значення у всіх точках, де встановлені вібродатчики, щодо показів датчика на подушці опорного валка з боку приводу (див. рис. 3.1).

У кожній кліті виконали до 30 дослідів. В результаті статистичної обробки визначали середнє значення часу $[\tau_i]$ в i -х точках. Їх значення наведені на рис. 4.16 для кліті ДУО, що містить найбільшу довжину лінії приводу (20,5 м) і кліті № 5. Дані відповідають прокатці слябів подвоєною маси (довжини), коли в результаті удару металу об валки відбувається найбільше розмикання зазорів в шпиндельному зчленуванні. Як бачимо, зі збільшенням відстані від прокатної кліті час запізнювання зростає, що природно. Для кліті ДУО значення $[\tau_i]$ виявилися близькими до представлених на рис. 3.23, рис. 3.26, коли час напрацювання (зносу зчленування) шпинделів було найбільшим.

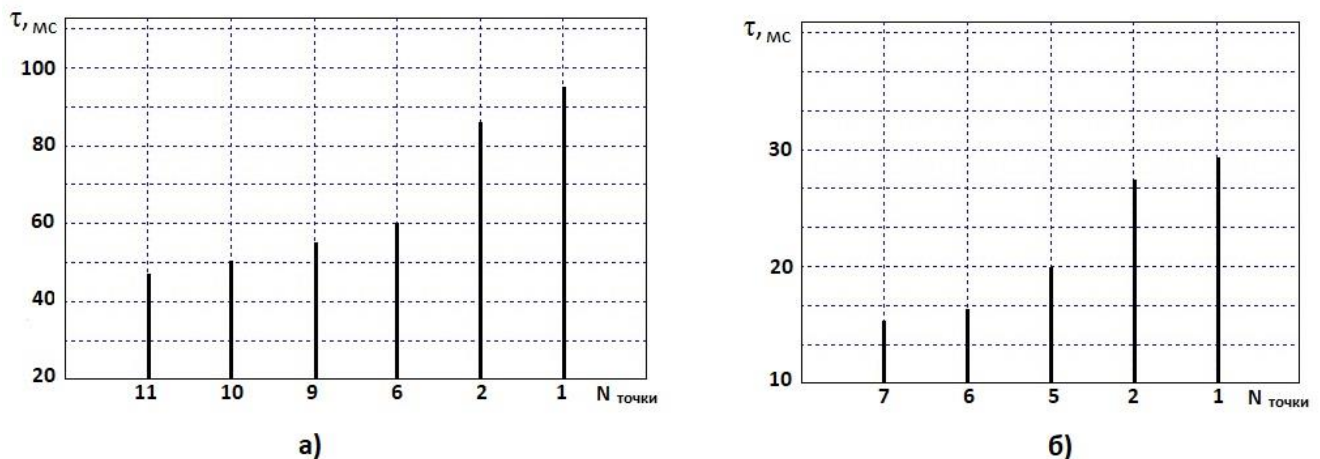


Рисунок 4.16 – Допустимі значення часу запізнювання $[\tau_i]$ в основних точках лінії приводу клітей ДУО (а) і № 5 (б)

Отримані таким чином значення $[\tau_i]$ прийняті в якості граничних (що допускаються), при підході до яких або їх досягненні, необхідно виконувати ремонтні роботи. Подібні граничні значення $[\tau_i]$ визначені для інших клітей стану 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» і разом з інструкцією по використанню передані діагностичній службі, яка обслуговує стан.

Тут слід взяти до уваги наступні обставини, що є кілька різних значення $[\tau_i]$. Виникає питання, яке з них слід прийняти в якості одного діагностичного параметра.

У роботах [99-101] показано, що найбільшому зносу лінії приводу піддаються бронзові вкладиші в шпинделях. Найбільша розрахункова швидкість зношування поверхні тертя вкладиша становить $v_{\max} = 5,2 \cdot 10^{-4}$ м/с [103]. На практиці знос вкладишів шарніра шпинделів першої чистової кліті стану 2000 ПАТ «Севресталь» становить приблизно 10 мм на місяць. При неповному завантаженні стану швидкість зносу складає $7 \cdot 10^{-4}$ м/с. За даними записів агрегатних журналів швидкість зносу вкладишів в кліті № 5 стану 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» становить $5,7 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Регулярні виміри показують, що відповідно до збільшення зносу в шпинделях відбувається збільшення часу запізнювання шпиндельної ділянки. Час $[\tau_i]$ на інших ділянках включає час $[\tau_{11}]$ і збільшується відповідно до швидкості зносу вкладишів шпинделів. У зв'язку з цим основною діагностичною ознакою і його граничним значенням слід приймати $[\tau_{11}]$. Решта значень $[\tau_i]$ також піддаються аналізу на предмет появи можливого «викиду». При його наявності здійснюється більш детальний аналіз «підозрюваного» вузла, наприклад, швидкості поширення імпульсу між точками.

4.9 Висновки

1. Розроблено нові способи визначення ТС вузлів механічного обладнання ліній головного приводу валків прокатних станів.

2. У способах використовуються особливості режимів технології і роботи станів та представлення результатів статистичної обробки даних вимірювань.

3. Працездатність способів наведена на підставі фактичних вимірювань та результатів їх обробки.

Результати, викладені в розділі, опубліковані в роботах [91-96, 98].

РОЗДІЛ 5

ВПРОВАДЖЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ НА СТАНІ 1680

5.1 Структура і технічні характеристики системи

Метою створення системи контролю технічного стану (СКТС) електродвигунів, силових редукторів та шестеренних клітей на БШШС 1680 ЦГПТЛ ПрАТ «Запоріжсталь» є побудова сучасної багаторівневої ієрархічної системи, яка виконує діагностику, аналіз відхилень параметрів роботи обладнання на підставі вимірювання вібраційних і технологічних параметрів та передачу інформації про технічні параметри роботи обладнання і супутньої аналітичної інформації в системи верхнього рівня [102, 103].

Система забезпечує [104-107]:

1. Вимірювання та відображення загального рівня СКЗ віброшвидкості в діапазоні 10...1000 Гц.
2. Вимірювання та відображення ПІК та СКЗ віброприскорення в діапазоні до 10000 Гц.
3. Вимірювання та відображення форми сигналу в діапазоні до 10000 Гц.
4. Вимірювання та відображення форми огибаючої сигналу в діапазоні до 10000 Гц.
5. Вимірювання спектрів огибаючої з різними 1/3 октавними фільтрами до 2000 Гц.
6. Вимірювання пік-фактору в полосі до 10000 Гц.
7. Вимірювання ексцесу у вибраній полосі до 10000 Гц.
8. Спектральна щільність до 12800 ліній.
9. Довжина вибірки (форма сигналу, форма огибаючої) до 32700 точок.
10. Вимірювання та відображення температури від +45° С до +140° С.

5.1.1 Загальна характеристика об'єкта контролю

Устаткування БШПС 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» являє собою:

1. Кліть ДУО, що складається з:

- електродвигуна типу МПС 2000-450 УЗ, потужністю 2000 кВт, частота обертання 450...500 об/хв;
- силового редуктора ЦОС-240, крутний момент вихідного валу 686,7 кН·м, міжосьова відстань 2400 мм;
- силового редуктора ЦОС-140, крутний момент вихідного валу 158,7 кН·м, міжосьова відстань 1400 мм;
- шестеренної кліті 900, максимальна кутова швидкість робочих валків 20,84 об/хв.

2. Чорнова кліть №1, що складається з:

- електродвигуна типу СДПЗ-6300-428УХЛ4, потужність 6300 кВт, частота обертання 428 об/хв;
- силового редуктора ЦД4-400, крутний момент вихідного валу 2300 кН·м, міжосьова відстань 3387 мм;
- шестеренної кліті 1000, максимальна кутова швидкість робочих валків 22,2 об/хв.

3. Чорнова кліть №2, що складається з:

- електродвигуна типу СДПЗ-4000-500УХЛ4, потужність 3700 кВт, частота обертання 500 об/хв;
- силового редуктора ЦД4-400, крутний момент вихідного валу 1814 кН·м, міжосьова відстань 3057 мм;
- шестеренної кліті 900, максимальна кутова швидкість робочих валків 25,5 об/хв.

4. Чорнова кліть №3, що складається з:

- електродвигуна типу МП-4000-500 УЗ-С, потужність 4000 кВт, частота обертання 500...600 об/хв;

- силового редуктора ЦД4-320, крутний момент вихідного валу $880 \text{ кН} \cdot \text{м}$, міжосьова відстань 2538 мм;
- шестеренної кліті 620, максимальна кутова швидкість робочих валків 59,1 об/хв.

5. Чорнова кліть №4, що складається з:

- електродвигуна типу МП-4000-500 УЗ-С, потужність 4000 кВт, частота обертання 500...600 об/хв;
- силового редуктора ЦД-1944, крутний момент вихідного валу $650 \text{ кН} \cdot \text{м}$, міжосьова відстань 1944 мм;
- шестеренної кліті 620, максимальна кутова швидкість робочих валків 81,5 об/хв.

6. Чистова кліть №5, що складається з:

- електродвигуна типу AMZ 1600 FF12, потужність 7000 кВт, частота обертання 50...600 об/хв (базова – 340 об/хв);
- силового редуктора, крутний момент вихідного валу $950 \text{ кН} \cdot \text{м}$, міжосьова відстань 2580 мм;
- шестеренної кліті 620, максимальна кутова швидкість робочих валків 69,2 об/хв.

7. Чистова кліть №6, що складається з:

- електродвигуна типу AMZ 1600 FF12, потужність 7000 кВт, частота обертання 50...600 об/хв (базова – 340 об/хв);
- силового редуктора, крутний момент вихідного валу $700 \text{ кН} \cdot \text{м}$, міжосьова відстань 1776 мм;
- шестеренної кліті 620, максимальна кутова швидкість робочих валків 139 об/хв.

8. Чистова кліть №7, що складається з:

- електродвигуна типу AMZ 1600 FF12, потужність 7000 кВт, частота обертання 50...600 об/хв (базова – 340 об/хв);

- силового редуктора, крутний момент вихідного валу $350 \text{ кН} \cdot \text{м}$, міжосьова відстань 1440 мм;
- шестеренної кліті 620, максимальна кутова швидкість робочих валків 236 об/хв.

9. Чистова кліть №8, що складається з:

- електродвигуна типу AMZ 1600 FF12, потужність 7000 кВт, частота обертання 50...600 об/хв (базова – 340 об/хв);
- силового редуктора, крутний момент вихідного валу $300 \text{ кН} \cdot \text{м}$, міжосьова відстань 1128 мм;
- шестеренної кліті 620, максимальна кутова швидкість робочих валків 335 об/хв.

10. Чистова кліть №9, що складається з:

- електродвигуна типу AMZ 1600 FF12, потужність 7000 кВт, частота обертання 50...600 об/хв (базова – 340 об/хв);
- силового редуктора, крутний момент вихідного валу $245 \text{ кН} \cdot \text{м}$, міжосьова відстань 984 мм;
- шестеренної кліті 620, максимальна кутова швидкість робочих валків 417 об/хв.

11. Чистова кліть №10, що складається з:

- електродвигуна типу AMZ 1600 FF12, потужність 7000 кВт, частота обертання 50...600 об/хв (базова – 340 об/хв);
- силового редуктора, крутний момент вихідного валу $196 \text{ кН} \cdot \text{м}$, міжосьова відстань 924 мм;
- шестеренної кліті 620, максимальна кутова швидкість робочих валків 461 об/хв.

5.1.2 Технічний опис СКТС «Корунд»

СКСТ «Корунд» призначена для попередження аварій, виробничих неполадок динамічного обладнання шляхом безперервного моніторингу його ТС [108-109].

СКТС забезпечує виконання таких функцій:

- відображення поточних значень контрольованих параметрів на мнемосхемі та їх колірні індикації;
- відображення діаграми зміни ТС за обраний інтервал часу по всіх каналах;
- відображення обраних типів вимірів та контрольованих параметрів одночасно по всіх вибраних каналах за обраний інтервал часу;
- відображення обраних даних в реальному часі;
- детальний аналіз усіх контрольованих типів вимірів;
- розширений, призначений для користувача, аналіз тимчасової реалізації (розрахунок та відображення спектрів, пік-фактору, ексцесу та ін. за обраним користувачем фрагменту форми сигналу);
- підтримка фільтрації даних, що відображаються в залежності від режиму роботи;
- розрахунок та накладення на спектрограми частот несправностей;
- автоматичне формування звітів;
- відображення трендів декількох змінних;
- відображення тимчасових розгортки сигналів з фазовою міткою;
- накладення різних графіків для діагностики;
- відображення списків аварійних і системних подій;
- видачу командних сигналів в АСУ агрегатів, для запобігання аварійних ситуацій, аварій чи зменшення тяжкості їх наслідків, на підставі аналізу контрольованих системою параметрів;
- контроль достовірності одержуваної інформації;
- захист від несанкціонованого доступу до інформації;

- захист від випадкового або навмисного несанкціонованого знищення інформації.

Загальна структура системи СКТС «Корунд» представлена на функціональній схемі (рис. 5.1).

Всю систему структурно можна розділити на 3 основних рівня:

1 рівень. Польовий рівень (первинне обладнання), вимірювальний рівень (вторинне обладнання).

2 рівень. Мережевий рівень (рівень передачі та обміну даними).

3 рівень. Верхній рівень (рівень накопичення та обробки інформації).

Вимірювальний рівень СКТС.

Первинне обладнання включає в себе:

- віброперетворювач типу АС104 серії 3С (виробництва компанії «Connection Technology Center» США). Конструкція датчика забезпечує захист від проникнення твердих тіл і води - IP68, та захист від температур в межах від -50°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Датчики встановлюються на перехідник та з'єднуються 3-х метровим броньованим кабелем в клемну коробку. Монтаж датчика на поверхню наведено на рис. 5.2.

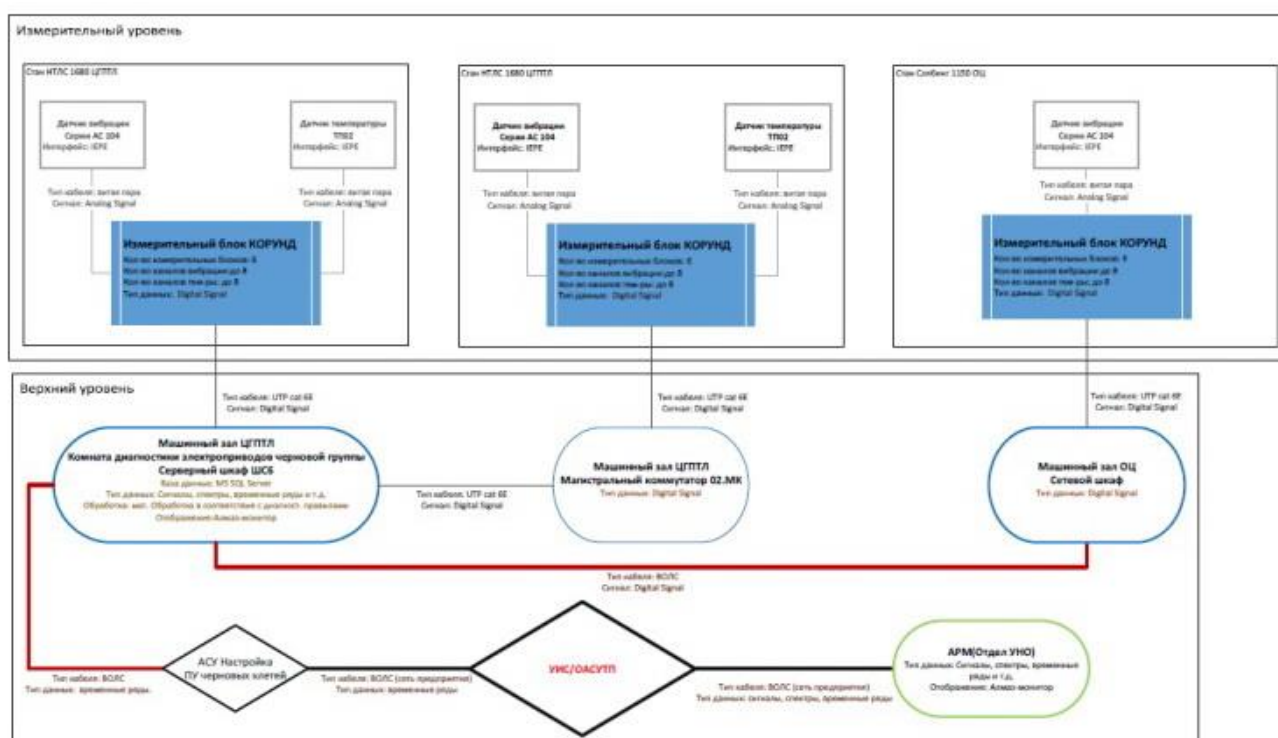


Рисунок 5.1 – Загальна структура системи СКТС «Корунд»



Рисунок 5.2 – Монтаж датчика вібрації
АС104-3С



Рисунок 5.3 – Монтаж датчика темпе-
ратури ТП02 (праворуч)

– датчик температури типу ТП02, встановлюється на перехідник і з'єднується броньованим кабелем в клемну коробку. Конструкція датчика забезпечує захист від проникнення твердих тіл і води - IP67, і захист від температур в межах від -50°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Монтаж датчика температури з перехідником на плоску та циліндричну поверхню здійснюється так-же як і датчик вібрації. Як перехідник для установки датчиків на поверхню агрегатів використовується металевий куб, який зварюванням кріпитися на підшипникову опору контрольованого обладнання. Монтаж датчика на поверхню наведено на рис. 5.3.

– датчик обертів монтується на спеціальному кронштейні, як показано на рис.5.4. Конструкція датчика забезпечує захист від проникнення твердих тіл і води - IP67, та захист від температур в межах від -25°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Для запуску відмітчика використовується мітка - пластина товщиною 2 мм. Запуск проводиться по передній кромці мітки, що слід враховувати при визначенні положення позначки нуля фази.

– клемна коробка (КК), монтується за допомогою кріпильних елементів на корпус обладнання. Клемна коробка призначена для комутації кабельних з'єднань від вимірювальних датчиків до вимірювального блоку «Корунд», а також для захисту цього підключення від механічних впливів та має ступінь захисту від попадання пилу і вологи - IP65, і захист від температур в межах в від -50°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Клемна коробка монтується на спеціальному кронштейні, як показано на рис. 5.5.



Рисунок 5.4 – Датчик обертів змонтований на спеціальному кронштейні



Рисунок 5.5 – Клемна коробка змонтована на спеціальному кронштейні

Вторинне обладнання включає в себе:

– блок вимірювальний БВ «Корунд» з сервісом обробки сигналу СМ8. Конструкція БВ забезпечує захист від проникнення твердих тіл і води - IP65, та захист від температур в межах від -15°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Змонтований БВ «Корунд» показано на рис. 5.6.

БВ призначений для обробки та аналізу сигналів, що надходять по лініях зв'язку від первинних перетворювачів (через клемні коробки).



Рисунок 5.6 – Змонтований блок вимірювальний «Корунд»

Технічні характеристики БВ:

– число сигнальних каналів	8
– тип сигнального каналу	АС або DC в режимі мультиплексування
– діапазон на каналі АС	від -2.5V до + 2.5V
– діапазон на каналі DC	від 0V до 24V
– число оборотних каналів	8
– частота обчислення	26367 Гц
– полоса пропускання	5...10000 Гц
– розрядність АЦП	24 біта
– передача даних	ETHERNET
– завантаження мережі при безперервній передачі	5 Мбіт/с
– транспортний протокол	TCP/IP
– живлення	24V постійне
– струм споживання	0.5A
– габарити плати	203×83×45 мм

Верхній рівень СКТС.

В якості серверного обладнання використовується промисловий сервер, який розташовується в монтажній шафі, що забезпечує захист від проникнення твердих тіл і води - IP54, та захист від температур в межах від +10° С до +50° С.

Серверне обладнання як і автоматизоване робоче місце діагноста живляться від джерела змінної напруги 220В, 50Гц. При відсутності напруги живлення електроживлення здійснюється від джерела безперебійного живлення протягом 30 хвилин.

Дані в систему MES та АСУТП передаються через OPC сервер. До складу комплексу програм входить OPC сервер. В процесі виконання пусконаладжувальних робіт формується список параметрів з розшифруванням ідентифікаційних номерів. Зчитування параметра проводиться OPC клієнтом по ідентифікаційному номеру. OPC сервером видаються всі параметри які розраховуються комплексом.

Будь-який з параметрів може бути лічений АСУТП і продубльований на сервері АСУТП.

Всі настройки комплексу є доступними кінцевому користувачеві.

Програмне забезпечення «АЛМАЗ - МОНИТОР» забезпечує збір, обробку, запис, зберігання та відображення результатів вимірювань і експортованих даних.

Невід'ємною частиною комплексу є БД, створена на базі Microsoft SQL Server. У ній містяться дані, отримані з контролерів, та налаштування системи в цілому (конфігурація апаратної частини системи, конфігурація програмного комплексу).

Компоненти комплексу працюють самостійно та можуть бути запуснені на різних комп'ютерах. Програми можна запускати на декількох комп'ютерах одночасно, а БД можна дублювати, встановивши на різні комп'ютери копії MS SQL Server. Ці моменти залежать від конфігурації системи, та вимог, що пред'являються персоналом, який обслуговує комплекс програм «АЛМАЗ-МОНИТОР».

Мережевий рівень СКТС.

Лінії зв'язку від клемних коробок до блоку вимірювального виконуються в броньованому рукаві, поміщені в металеву трубу.

Лінії зв'язку Ethernet виконуються кабелем для зовнішнього застосування, стійких до УФ випромінюванню. Прокладка ліній живлення для ВБ виконується кабелем для зовнішнього застосування.

Лінії оптичної зв'язку виконуються кабелем для зовнішнього застосування, стійких до УФ випромінюванню. Прокладка ліній живлення для серверного обладнання виконується кабелем для зовнішнього застосування.

Кабель прокладається з використанням існуючих кабельних трас. Діапазон робочих температур кабельної продукції від -25°C до $+100^{\circ}\text{C}$, а мережевого обладнання від -15°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

5.1.3 Склад СКТС «Корунд» стану 1680

Для контролю стану електродвигунів, силових редукторів та шестеренних клітей на БШШС1680 ЦГПТЛ ПрАТ «Запоріжсталь» використовується 86 датчиків вібрації, 73 датчика температури. Детальна компоновка контролюваного устаткування стану:

Кліть ДУО оснащується 11 датчиками вібрації; 10 датчиками температури. Механізми кліті оснащені:

- електродвигун - 1 датчик вібрації на підшипниковій опорі №1;
- 2 силових редуктора - 8 датчиків вібрації, 8 датчиків температури на підшипникових опорах №2-№9.
- шестерна кліть - 2 датчика вібрації, 2 датчика температури на підшипникових опорах №10, №11.

Схема розташування та монтажу вимірювального обладнання на агрегаті наводиться на рис. 5.7.

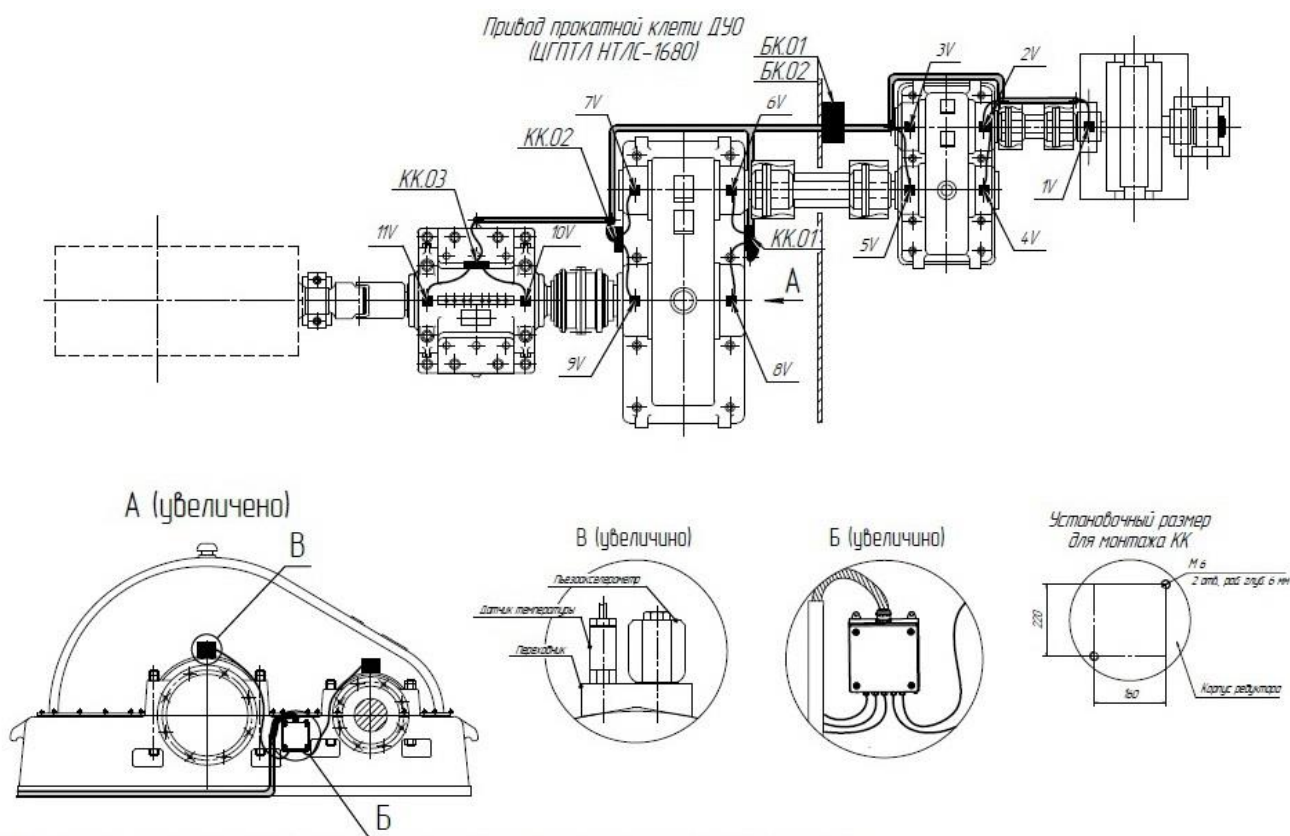


Рисунок 5.7 – Монтаж вимірювального обладнання на кліті ДУО

Лінія кліті №1, №2, №3 оснащується 24 датчиками вібрації та 21 датчиками температури. Механізми кожної кліті оснащуються:

- електродвигун - 1 датчик вібрації на підшипникову опору №1;
- силовий редуктор - 5 датчиків вібрації, 5 датчиків температури на підшипникові опори №2, №3, №4, №5, №6.
- шестеренна кліть - 2 датчика вібрації, 2 датчика температури на підшипникові опори №7, №8.

Схема розташування та монтажу вимірювального обладнання на агрегатах наводиться на рис. 5.8.

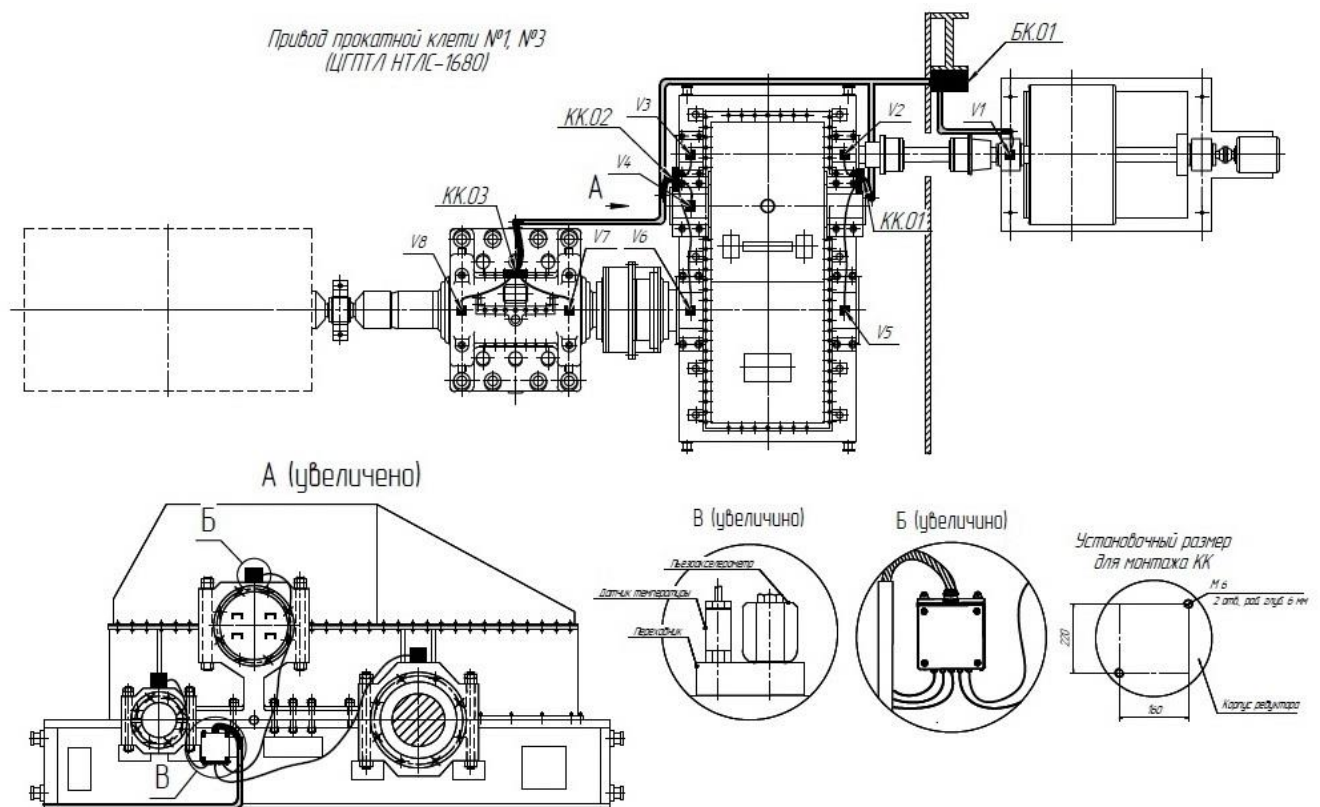


Рисунок 5.8 – Монтаж вимірювального обладнання на клітях №1, №2, №3

Лінія кліті №4-№10 оснащується 49 датчиками вібрації та 42 датчиками температури. Механізми кожної кліті оснащуються:

- електродвигун - 1 датчик вібрації на підшипникову опору №1;
- силовий редуктор - 4 датчика вібрації, 4 датчика температури на підшипникові опори №2, №3, №4, №5.

- шестеренна кліть - 2 датчика вібрації, 2 датчика температури на підшипникові опори №6,7.

Схема розташування та монтажу вимірювального обладнання на агрегатах наводиться на рис. 5.9.

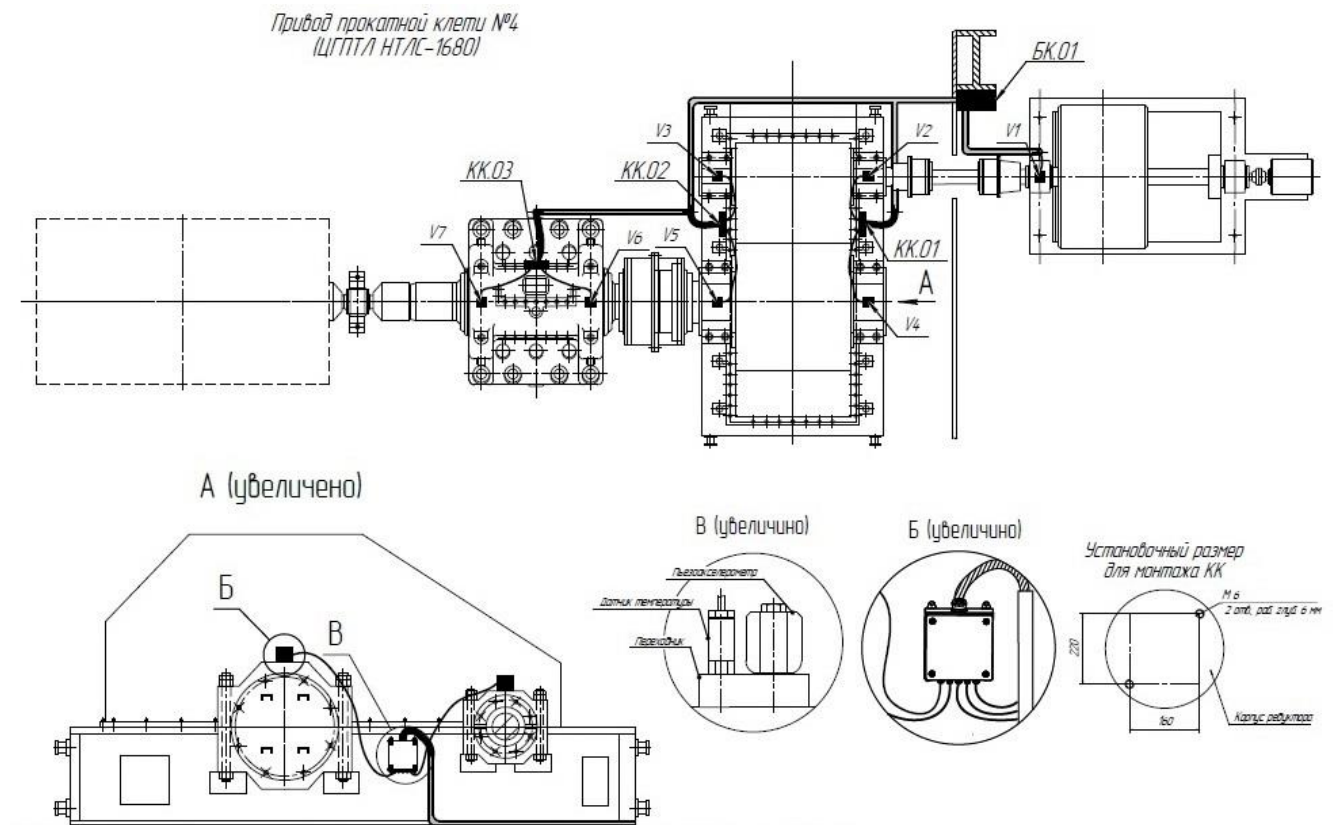


Рисунок 5.9 – Монтаж вимірювального обладнання на клітках №4-№10

5.1.4 Надійність СКТС

Термін служби системи не менше 10 років. Середнє напрацювання на відмову каналів вимірювання і контролерів становить не менше 40000 годин. Середній час відновлення СКТС «Корунд» з використанням ЗІП (при відсутності механічних пошкоджень магістральних кабелів) не більше 2 годин (за винятком часу доставки запчастин та часу доступу персоналу до елемента що відмовив).

СКТС забезпечена можливістю заміни вимірювальних модулів без відключення електроживлення всієї системи.

Блок вимірювальної СКТС має вбудовану функцію самодіагностики програмно-апаратних засобів, включаючи первинні перетворювачі (датчики) та лінії зв'язку, з виділенням несправного каналу і можливістю індикації стану модулів, канали яких несправні. Несправний канал виключається з алгоритмів захисту та сигналізації. БВ системи має спеціальні режими для перевірки, налаштування, калібрування вимірювальних каналів та аналізу в них несправностей.

В системі передбачений джерело безперебійного живлення для забезпечення безперервної роботи. При повній відсутності напруги живлення забезпечена робота системи протягом не менше 30 хв. Відновлення працездатності СКТС відбувається автоматично без участі обслуговуючого персоналу.

5.2. Обробка і представлення результатів вимірювань. Принципи формування бази даних вимірювань та обробки

Опис ПО «АЛМАЗ-МОНИТОР».

Програма індикації стану агрегату забезпечує візуальне відображення на екрані монітора всіх контрольованих параметрів: поточні значення, збережені дані в БД:

- вимір та відображення спектрів СКЗ віброшвидкості;
- вимір та відображення ППК і СКЗ віброприскорення;
- вимірювання частоти обертання та фазових характеристик вібрації;
- індикацію результатів усіх вимірювань на дисплеї;
- зв'язок із зовнішнім комп'ютером (PC) та архівація даних.

Опис роботи програмного комплексу. У цьому описі під терміном Комплекс буде розглядатися комплект програм:

- програма індикації стану агрегату ("_ГРАФИК");
- програма перезапуску комплексу («Reset» знаходиться у вигляді іконки, в довільному місці екрану, що пересувалися мишею); 

Використовуються також такі терміни:

- «Замір»: параметр, що знімається з датчика.
- «Канал»: канал обробки інформації з одного датчика.
- «Блок зв'язку»: отримані дані від модуля зв'язку.
- «Модуль зв'язку»: отримані дані від первинних перетворювачів (датчиків).
- «Агрегат»: оснащений агрегат.

Програма індикації стану агрегату має наступну структуру:

- Стан каналів - сторінка обліку та перегляду змін станів вузлів агрегату за минулий час;
- Поточні показання - сторінка моментальних вимірювань, з якої видно поточний стан агрегату;
- Тренди - сторінка відображення графіків контрольованих параметрів;
- Спектри - сторінка відображення графіків спектрів сигналів контрольованих параметрів;
- Сигнали - сторінка відображення сигналів, що надходять з датчиків абсолютної вібрації контрольованих каналів в графічному вигляді.

Структура сторінки «Поточні». На головній сторінці програми (рис. 5.10) виводяться два цехи зі значеннями параметрів, що контролюються в відповідних агрегатах. При переході в один з цехів відкривається вкладка цеху зі схематичним зображенням розташованих агрегатів (рис. 5.11), та кнопками з колірною індикацією (рис. 5.12). Якщо на агрегатах встановлені норми для параметрів, то агрегат буде підсвічуватися тим кольором в якій зоні він знаходиться.

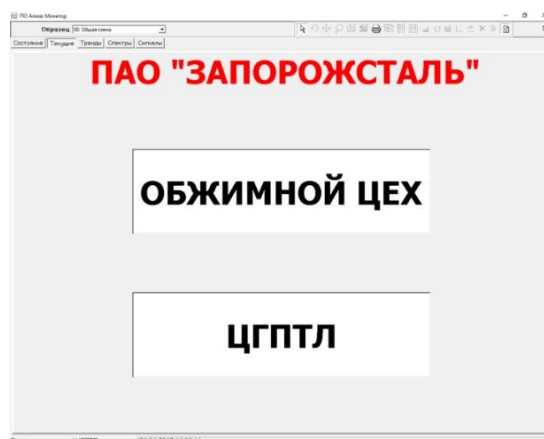


Рисунок 5.10 – Головна сторінка програми з двома цехами

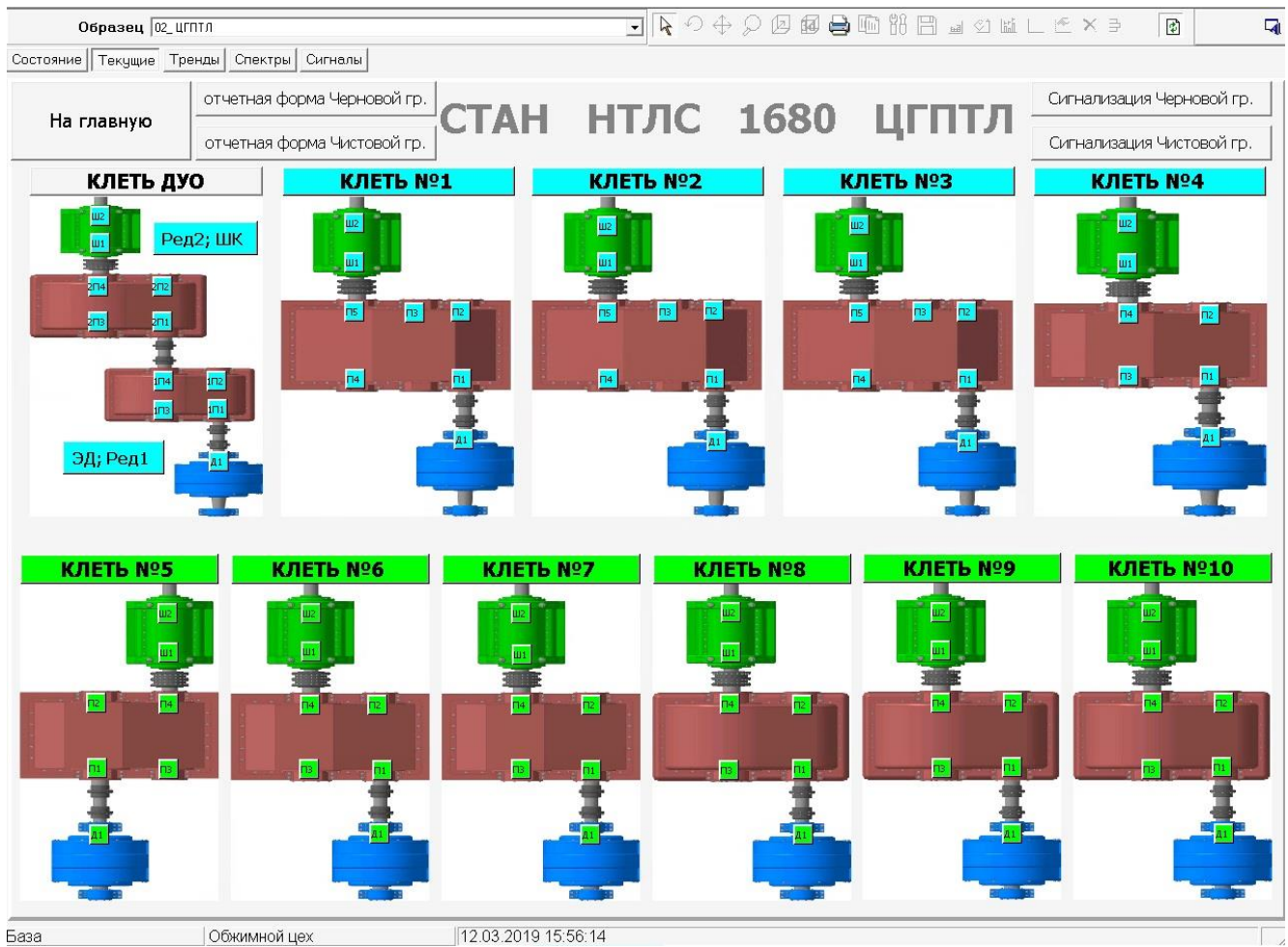


Рисунок 5.11 – Вкладка цеху зі схематичним зображенням розташованих агрегатів



Рисунок 5.12 – Колірна індикація агрегатів

Для зручності переходу між цехами та агрегатами, є вкладка «Зразок».

Також для виведення на екран спектрів та сигналів з датчика в кладках «Тренди», «Спектр», «Сигнал», для переходу між цехами необхідно скористатися вкладкою ЦГПТЛ / ОЦ, що знаходиться в нижньому правому куті програми.

При виборі на головній сторінці агрегату відбувається перехід на детальну структурну схему (рис.5.13), де відображені докладні місця установки з вказівкою напрямку і поточного значення вимірюваного параметра.

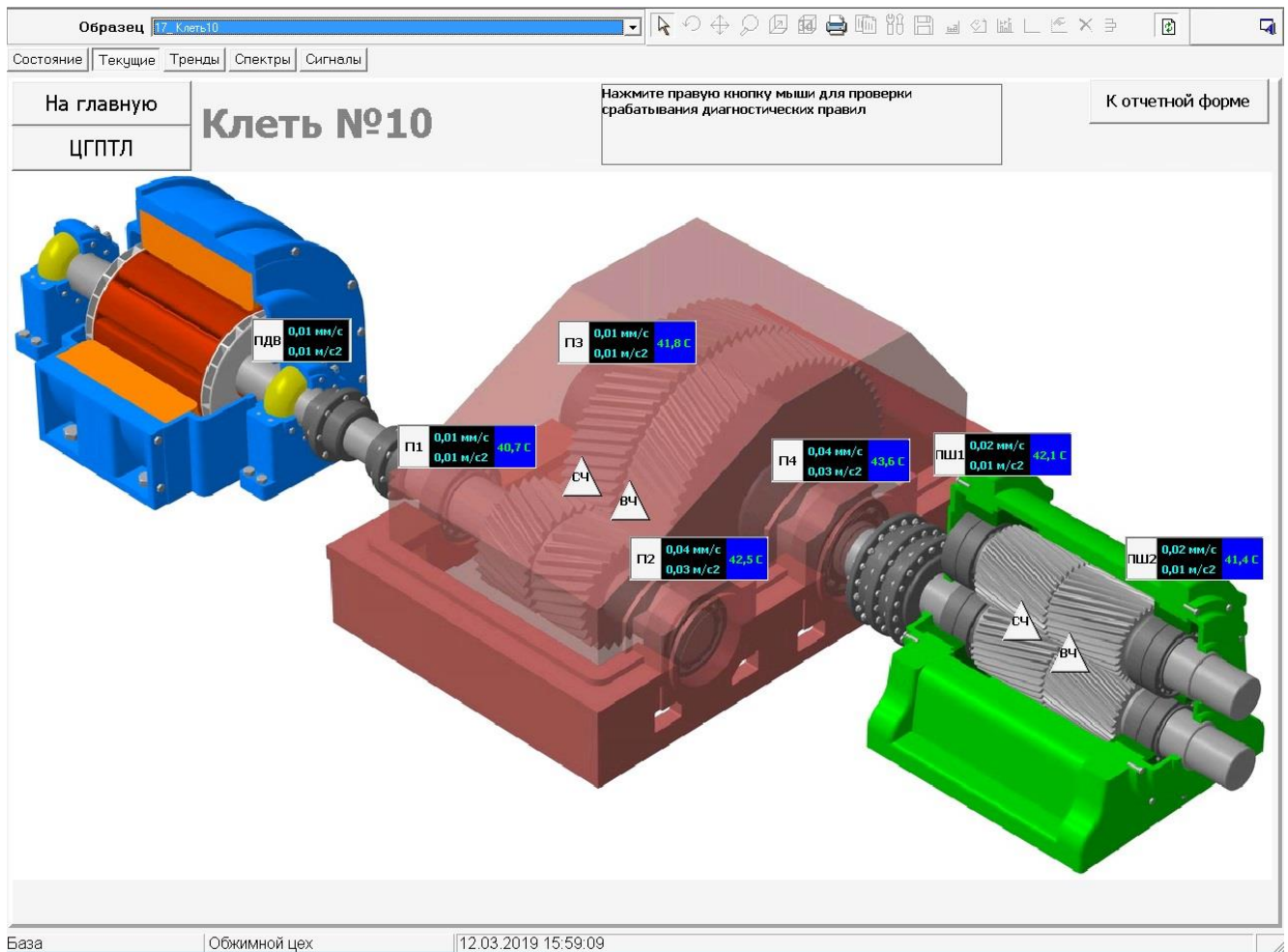


Рисунок 5.13 – Детальна структурна схема агрегату

Вимірювання абсолютної вібрації може проводитися в трьох напрямках – вертикальному (по осі симетрії підшипника), поперечно – горизонтальному та осьовому.

Для зручності оперативної оцінки стану обладнання, виконана індикація рівня вимірюваних параметрів кольором. Колір показань кожного датчика має свій поточний статус (поточний стан) (рис. 5.12). Зміни статусів залежать від порогових значень (уставок), прописаних окремо для кожного датчика і частотної полоси виміру та відображається кольором відповідно. Легенду відповідності кольору відображення статусу виміру можна переглянути на сторінці «Стан».

Параметр «СКЗ віброшвидкості» вимірюється в діапазоні від 2 Гц до 1000 Гц.

Параметр «пік віброприскорення» вимірюється в діапазоні від 5 Гц до 10000 Гц.

Параметр СЧ - середньо частотний вимір спектра віброприскорення для визначення наявності дефекту зубчастого зачеплення, діапазон від 1 кГц до 5 кГц.

Параметр ВЧ - високо частотний вимір спектра віброприскорення для визначення наявності дефекту зубчастого зачеплення, діапазон від 5 кГц до 10 кГц.

Вікно «експертної діагностики агрегату» за поточними значеннями параметрів вібрації. Для виклику експертної діагностики необхідно у вікні натиснути праву «кнопку миші», вибравши потрібний агрегат запустити діагностику (див. рис. 5.13).

Закладки верхнього рядка переходу (див. рис.5.13) служать для вибору сторінок різних способів графічного представлення контрольованих параметрів за певний період. Для переходу необхідно вибрати відповідну закладку. При виборі закладки «Стан» ви перейдете на сторінку обліку та перегляду змін станів вузлів агрегату за весь контрольний період.

Для переходу до вікна «звітної форми агрегату» необхідно натиснути ліву кнопку миші на відповідному написі (див. рис. 5.13), відкриється детальний звіт агрегату наведений на рис. 5.14.

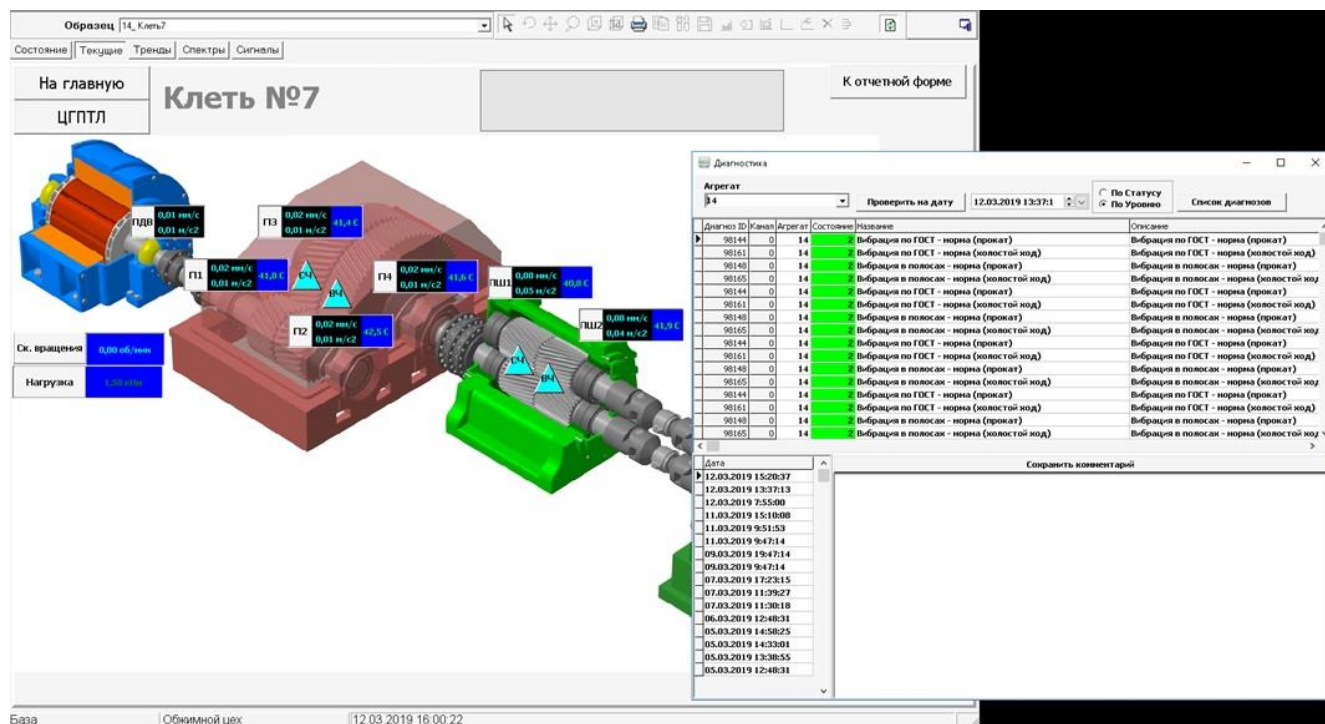


Рисунок 5.14 – Детальный звіт стану агрегату

Вікна сигналізації за середнім значенням вібропараметрів. Для виведення вікна сигналізації по агрегатам необхідно:

1. Вибрати потрібний цех ЦГПТЛ.
2. Натиснути на кнопку для переходу «до чорнової» або «до чистової».

Далі відкривається вікно сигналізації за середніми показниками вібропараметрів, зображення якого наведено на рис. 5.15.

Колонка «Час1» Середньочасове значення вібропараметра за годину від поточного (наприклад, при запиті даних в період з 9:00 до 10:00 виводиться середнє значення з 8:00 по 9:00).

Колонка «Час2» Середньочасове значення вібропараметра за 2 години від поточного (наприклад, при запиті даних в будь-який період з 9:00 до 10:00 виводиться середнє значення з 7:00 до 8:00).

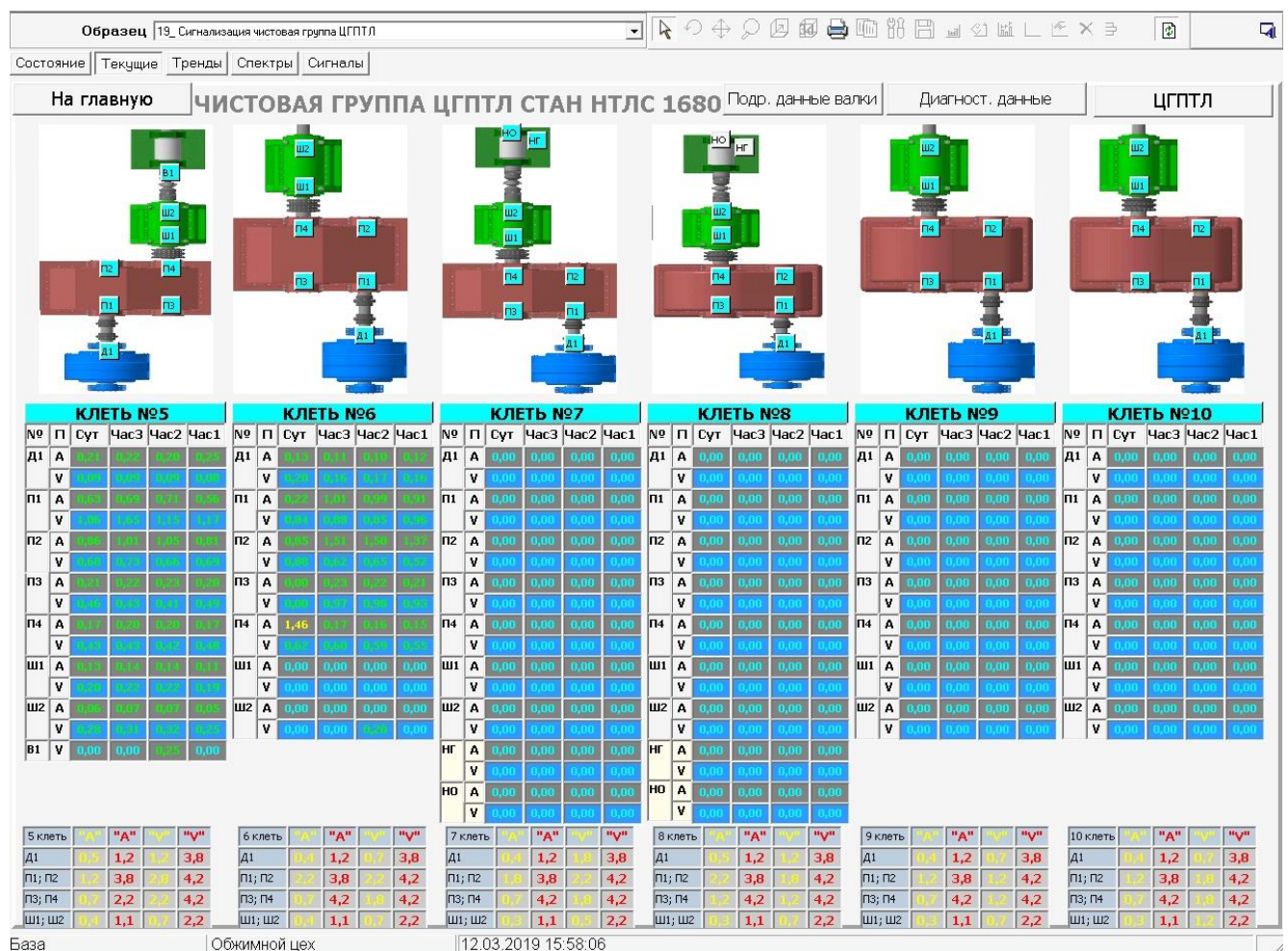


Рисунок 5.15 – Сигналізація за середніми показниками вібропараметрів

Колонка «Час3» Середньочасове значення вібропараметра за 3 години від поточного (наприклад, при запиті даних в будь-який період з 9:00 до 10:00 виводиться середнє значення з 6:00 по 7:00).

Колонка «Зміна» Середньозмінне значення вібропараметра за минулу зміну.

Колонка «Сут» середньодобове значення вібропараметра за минулу добу (наприклад, при запиті даних в будь-який період з 0:00 до 24:00 виводиться середнє значення минулої доби з 0:00 по 24:00).

Оновлення часових значень – щогодини; змінних – кожну зміну; і т.п.

Структура сторінки «Стан». При виборі закладки «Стан» в верхньому рядку кнопок переходу (див. рис. 5.15) здійснюється перехід на сторінку стану всіх контрольованих параметрів (рис.5.16). При переході на дану сторінку необхідно натиснути на кнопку в лівому нижньому кутку. На даній сторінці виводиться графік зміни стану вимірюваних параметрів за весь контрольний період. Вибір певного періоду часу, можна здійснювати різними способами. При необхідності перегляду стану каналів за необхідний період часу, необхідно скористатися відповідним меню в лівому нижньому кутку над кнопкою «Показати».



Рисунок 5.16 – Сторінка стану контрольованих параметрів

Необхідний період часу можна задати з клавіатури або скористатися вбудованим календарем, для цього необхідно «клікнути» на кнопці правіше дати. Натиснувши лівою кнопкою миші на графіку можна дізнатися точний час подій в цій точці графіка. Крім цього, можна також переглянути стан каналів за попередній день, годину, зміну і т.п. Список контрольованих параметрів виводиться зліва від графіка. При необхідності можна відключити певні параметри.

Зміна статусу каналів на графіку позначається спеціальними індикаторами. Для детального перегляду стану каналу в даний період часу, можна змінити часовий період. Для цього необхідно натиснути правою кнопкою миші на графіку поруч з індикатором зміни статусу каналу.

При подвійному натисканні лівої кнопки миші за станом одного з механізмів буде відкрито вкладка «Тренди» і будуть побудовані тренди параметра «віброшвидкості» по всім каналам за той проміжок часу, який був обраний раніше (див. рис. 5.17).

Структура сторінки «Тренди». Тренд – залежність контрольованого параметра від часу. На кожній сторінці графіків присутні такі елементи управління як: список параметрів для відображення; кнопки зміни режиму маніпуляцій з графі-

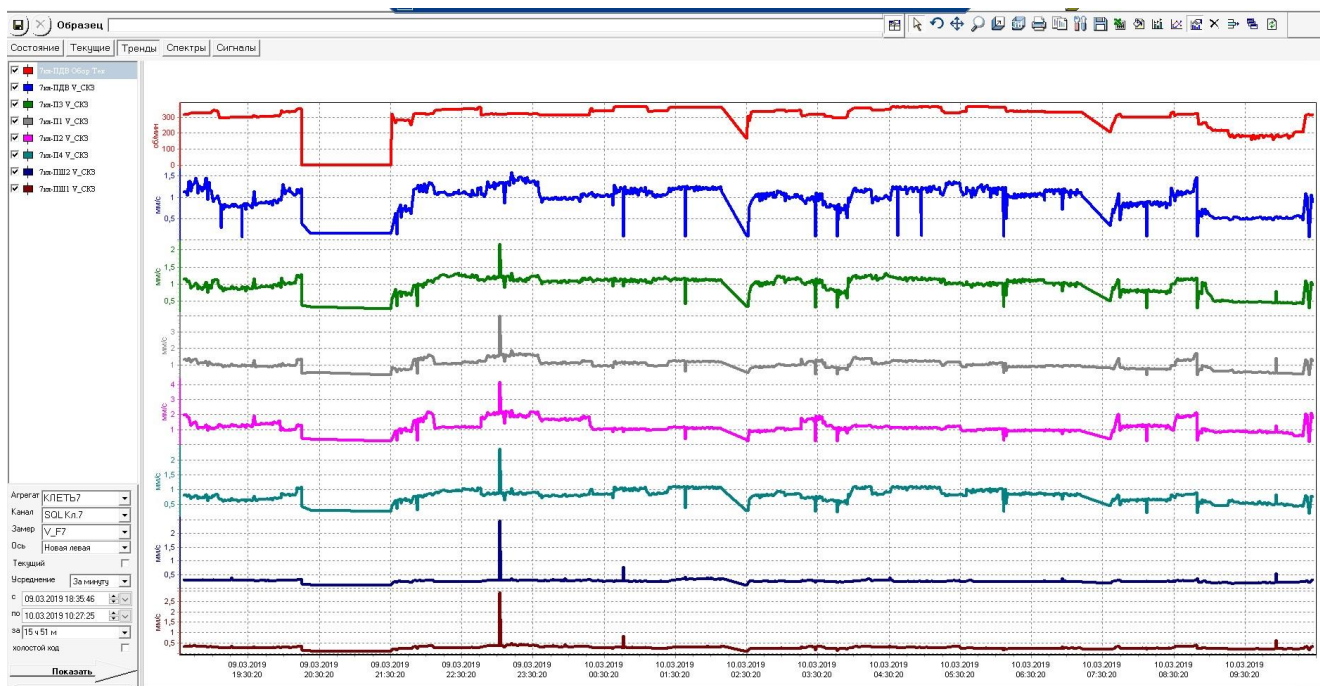


Рисунок 5.17 – Вкладка «Тренди» «віброшвидкості» по всім каналам кліті

ком; додаткове меню вибору параметрів відображення графіків; кнопки завдання інтервалу часу.

Для того щоб вивести на екран інформацію по потрібному каналу вимірювання (підшипника) необхідно (рис. 5.18):

1. Вибрати цех за допомогою натискання «лівої» кнопки миші на назви цеху в нижньому лівому кутку програми.
2. Вибрати - «Агрегат» → «Канал» → «Замір»
3. Для виведення інформації про поточне значення - залишити галочку на рядку «поточні значення» та натиснути кнопку «показати», програма почне промальовування обраного параметра в реальному часі.
4. Для виведення інформації за минулий період (зміну, день) необхідно зняти галочку з рядка «поточні значення», потім поставити період перегляду та натиснути кнопку «показати».

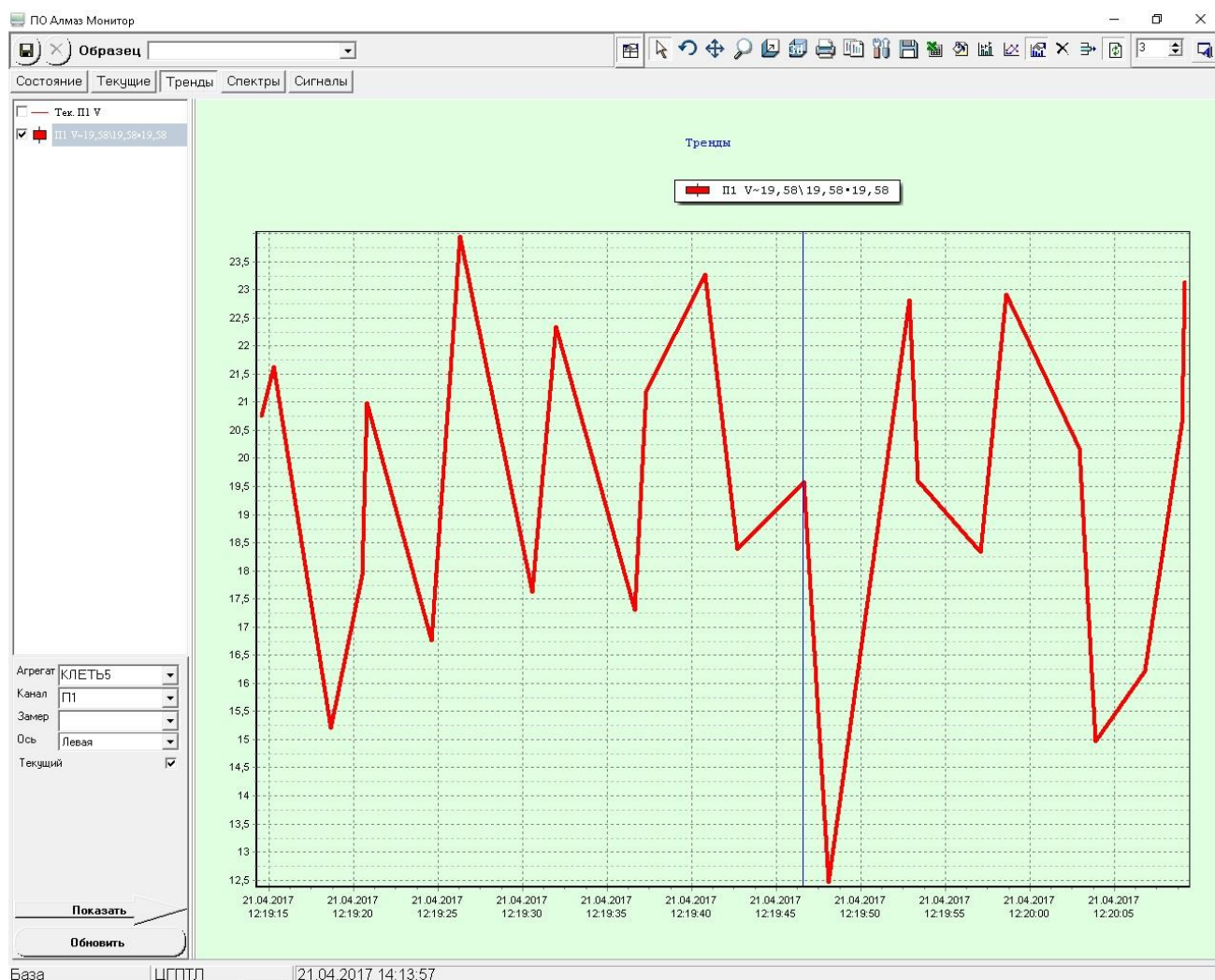


Рисунок 5.18 – Тренд по потрібному каналу вимірювання (підшипника)

Оцінка загального рівня вібрації в стандартній полосі частот і в певному поданні служить для оцінки поточного стану обладнання та його попередньої діагностики. Стандарт вказує діапазон контрольованих частот вібрації, який повинен охоплювати частотний спектр коливань машини.

Для можливості вибору різних вимірів по кожному каналу служить додаткове меню вибору параметрів відображення графіків. Тут для кожного контрольованого параметра можна вибрати канал, вимір, вісь (для зручності відображення різних вимірів на одному графіку). Для відображення значень контрольованих параметрів з архіву бази, необхідно зняти «галочку» навпроти напису «Поточний». Для обраного виміру можна додатково задати діапазон часу і діапазон усереднення. Після вибору виміру - натиснути кнопку «Показати». Він з'являється в списку у вікні «Список контрольованих параметрів». Для відображення даних без усереднення необхідно скористатися вкладкою «сирі», при цьому вибрати дату і час виміру та натиснути кнопку «Показати». Дані без усереднень зберігаються в базі 2 дні при відсутності аварійних значень, та 7 днів при наявності значень «аварія».

За допомогою «Кнопок маніпуляції з графіками» виконуються різні дії зі зміни способу відображення графіків, їх збереження, друку і т.п.

Структура сторінки «Спектри». На сторінці «Спектри» в графічному вигляді представляються залежності амплітуди гармонійних складових вібрації від їх частоти.

Більшість дефектів мають жорсткий зв'язок з частотою обертання роторів агрегату та (або) режимами його роботи. Досліджуючи залежність зміни спектрального складу вібрації від різних факторів, та порівнюючи їх, можна зробити висновок про причини підвищеної вібрації.

Також у вкладці «Спектри» можна побудувати зі спектра віброприскорення спектри віброшвидкості та вібропереміщення, натисканням правої кнопки миші, при цьому встановивши курсор на самому спектрі, вибравши потрібний нам спектр, програма виведе його на екран.

На даній сторінці можна переглянути поточні спектри вібрації по окремому каналу (рис. 5.19) або декількох каналах одночасно. При цьому після введення

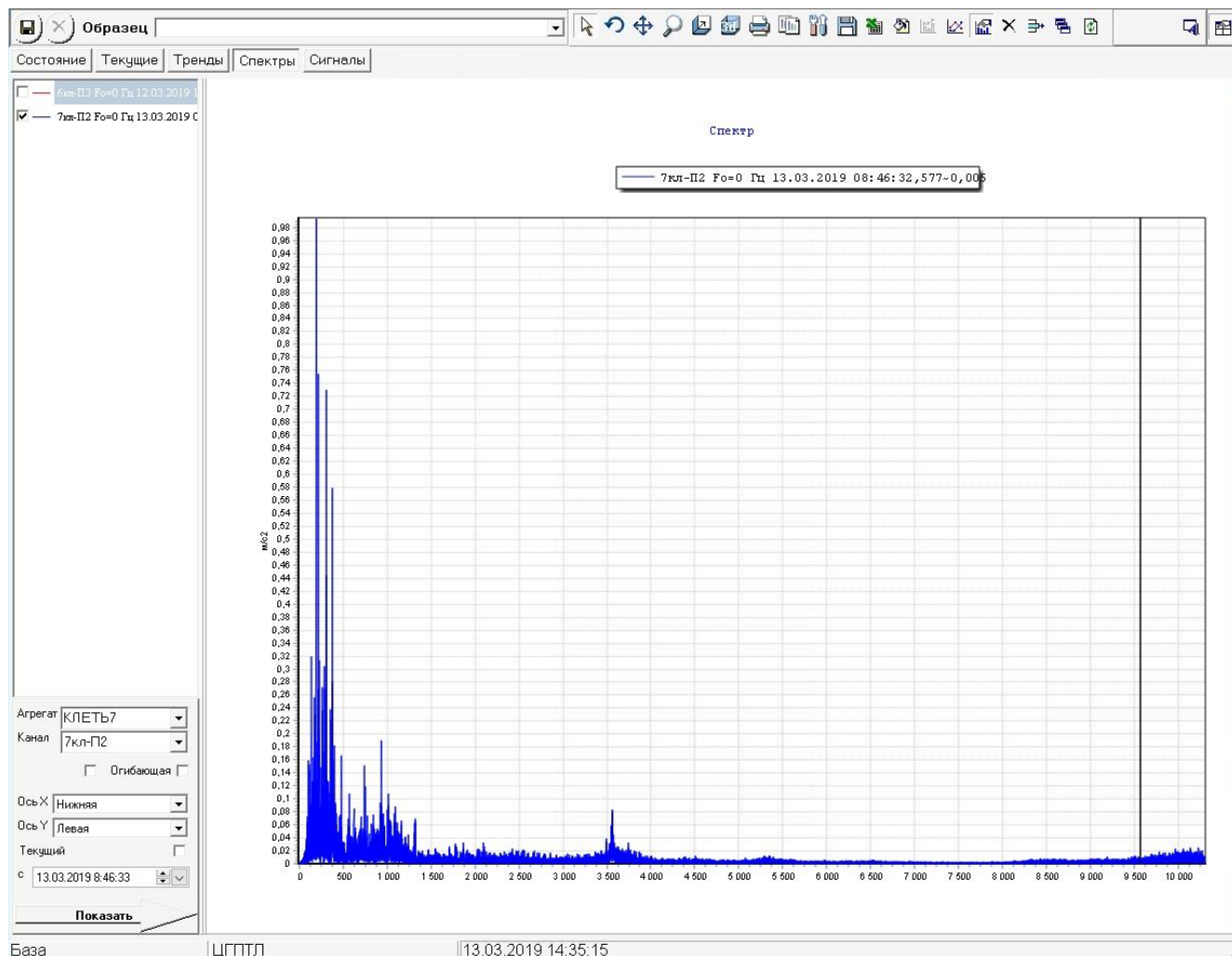


Рисунок 5.19 – Сторінка поточного спектру вібрації по окремому каналу

спеціального каналу необхідно повторно натиснути кнопку «Показати».

Для зручності перегляду каскаду спектрів можна користуватися різними кнопками в панелі «Кнопок маніпуляції з графіками». Доступна функція «Огинающая» з можливістю установки частотного фільтра. Як і спектр, огинаючу можна переглядати в режимі реального часу, так і взяти архівні дані, вказавши дату та час.

Структура сторінки «Сигналы». На сторінці «Сигналы» здійснюється відображення сигналу контрольованого каналу абсолютної вібрації в графічному вигляді.

За формою сигналу можна визначити наявність биття або, скажімо, амплітудної модуляції, на ній видно неперіодичні складові вібрації (удари і т.п.).

На даній сторінці є можливість перегляду форми сигналу датчиків абсолютної вібрації, як поточних значень, так і з бази за певну дату (рис. 5.20).

Для діагностичних цілей у вкладці «сигнали» є спеціальна функція побудови спектрів за допомогою програми «python script», для виведення її на екран досить натиснути правою кнопкою миші при цьому поставивши курсор, з появи меню вибрати потрібний параметр, з протягом деякого часу програма покаже потрібний спектр.

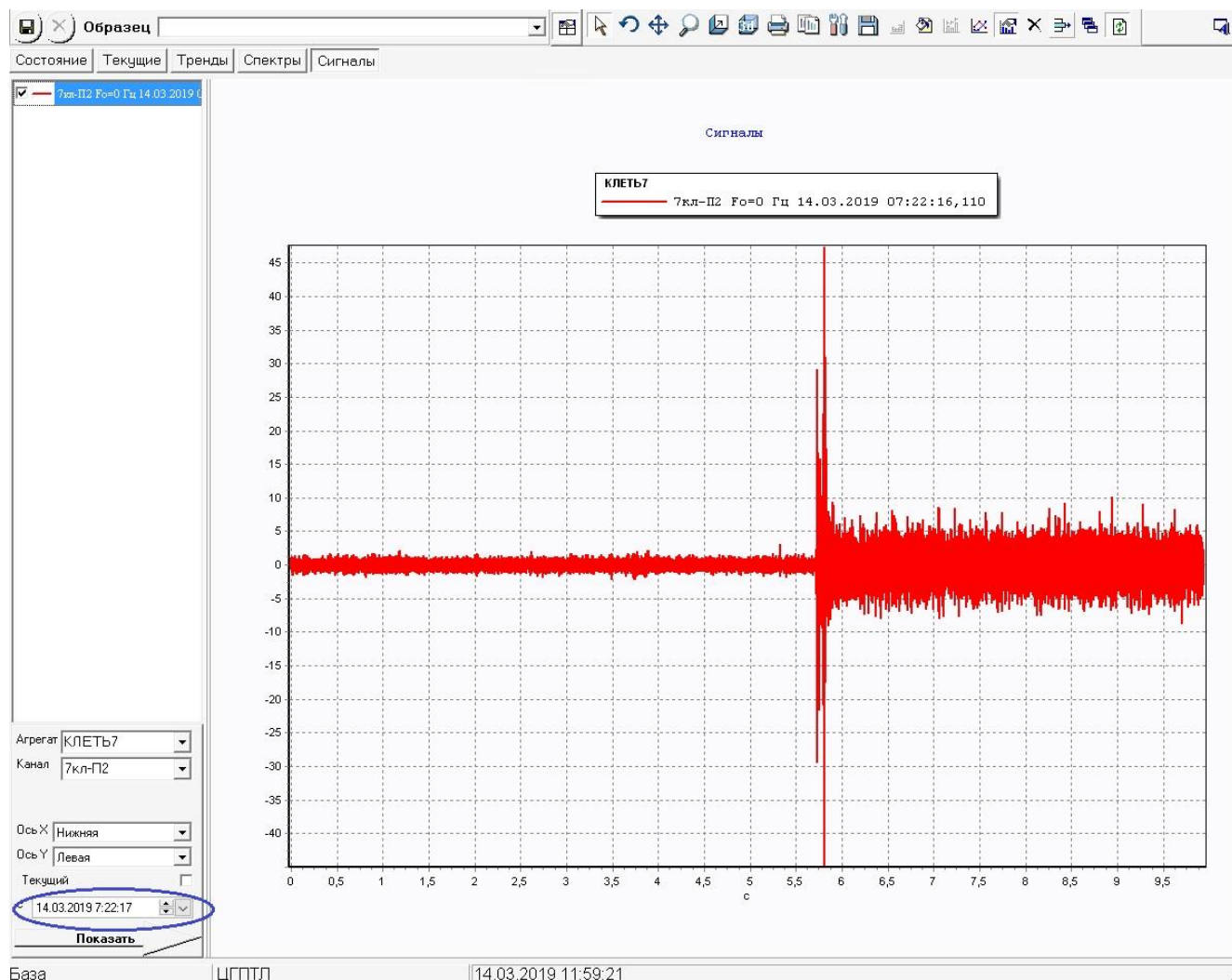


Рисунок 5.20 – Форма сигнала абсолютной вибрации по отдельному каналу

5.3 Розробка методики моніторингу вібраційних процесів обладнання всіх клітей безперервного стану

Діагностичний модуль та сигналізація [99].

Діагностичний модуль, що входить в СКТС, виконує періодичний аналіз отриманих вібраційних сигналів та визначає наявність / відсутність дефектів на контрольованому устаткуванні, наприклад, шестеренна кліть / редуктор / привід.

Висновки, видані експертним модулем, носять рекомендаційний характер. Остаточне рішення про виведення обладнання на технічне обслуговування або в ремонт приймається службою діагностики.

Якщо зауважень до роботи вузла немає, то на мнемосхемі вузол підсвічується зеленим кольором (пріоритет - нормальна робота). Вузол має малу ступінь ймовірності відмови при тривалій експлуатації на нормальному режимі.

Якщо контрольований вузол має дефект що розвивається підшипника / зубчастого зачеплення / муфти на мнемосхемі вузол підсвічується жовтим кольором (пріоритет - увага). Наявність дефектів що розвиваються веде до зростання ймовірності відмови вузла. Персоналу може бути видана рекомендація виконати технічне обслуговування даного вузла в період планового ТО.

Якщо у вузлу має місце розвинений дефект на мнемосхемі даний вузол підсвічується червоним кольором (пріоритет - вимагає вжиття заходів). Наявність розвинених дефектів тягне за собою підвищену ймовірність відмови вузла. Персоналу видається рекомендація підготувати даний вузол до виводу в плановий ремонт.

У СКТС передбачено визначення та фіксування в базі даних перевищення доступних рівнів контрольованих параметрів з визначенням часу перевищення й точки, в якій відбулося перевищення рівня.

СКТС передбачена можливість передачі та відображення інформації в місця цілодобового контролю у вигляді світлової сигналізації.

5.4 Практичні приклади діагностування вузлів агрегатів

Метою створення СКТС електродвигунів, силових редукторів та шестеренних клітей на стані було побудова сучасної багаторівневої системи, яка виконує аналіз параметрів роботи обладнання і діагностику на підставі вимірів вібраційних сигналів та безперервний моніторинг працездатності даного обладнання.

Стан 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» складається з послідовно розташованих п'яти чорнових і шести чистових клітей (рис. 5.21).

Кожна кліть включає два опорних та два робочих валка, які приводяться від електродвигуна через редуктор, шестеренну кліть і універсальні шпинделі (див. рис. 5.22).

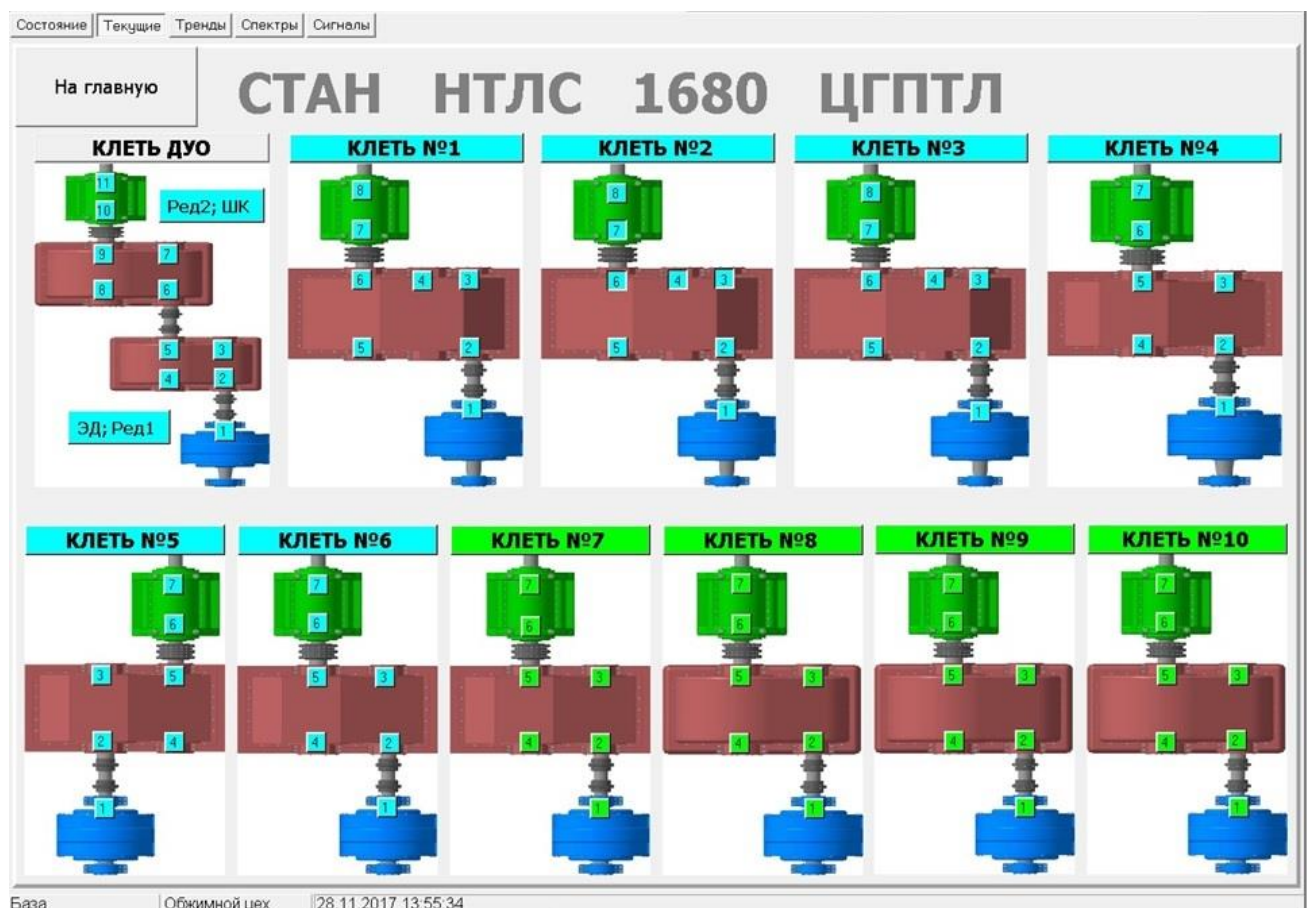


Рисунок 5.21 – Схема розташування датчиків вібрації в точках 1 - 11

ліній приводу клітей стану 1680 з кольоровою індикацією:

зелений колір транспарантів - показники в сталому режимі прокатки;

блакитний - в режимі холостого ходу

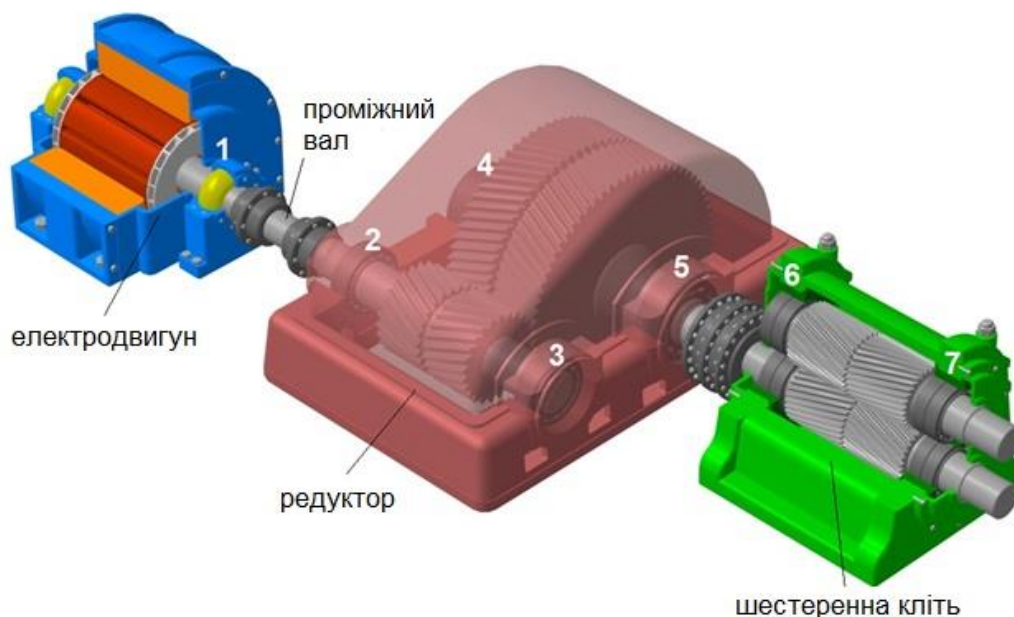


Рисунок 5.22 – Схема та лінії приводу валків прокатної кліті:

т.1 - т.7 - точки установки датчиків вібрації.

Кожна кліть оснащена від 7 до 11 датчиками, встановленими на корпусному обладнанні. Місця їх розташування обрані таким чином, щоб можна було діагностувати підшипники та зубчасті зачеплення муфт, редукторів і шестеренних клітей (див. рис.5.21).

Для зручності оперативного реагування експлуатаційного персоналу цеху на показання системи в програмі реалізована сигналізація за середнім значенням основних вібраційних параметрів згідно (рис. 5.23) (А – віброприскорення, м/с^2 , діапазон частот $2 \dots 10000$ Гц; V – віброшвидкість, мм/с , діапазон частот $2 \dots 1000$ Гц). Додатково контролюються: пік-фактор, ексцес та віброприскорення в 3-х діапазонах.

Усереднені значення вібраційних параметрів по кожній точці контролю відображаються на екрані монітора з урахуванням специфіки прокатного виробництва: Час 1 - середнє значення за 1 годину від поточного часу; Час 2 - середнє значення за 2 години від поточного часу; Доба - середнє значення за добу.

Нормування вібраційних параметрів передбачено для двох режимів роботи обладнання: сталий процес прокатки на постійній швидкості та холостий хід.



Рисунок 5.23 – Відображення вібраційного стану вузлів кліті №8.
Підшипник № 3 (серії 97773) - зростання віброприскорення та його вплив на суміжний підшипник № 5 (вказано стрілкою) [77].

Випадок 1. За результатами промислової експлуатації системи виявлена несправність підшипника серії 97773 встановленого на ведучому валу редуктора кліті 8 (т. 3 на рис. 5.22). Підшипник є роликовим, конічним, дворядним, з внутрішнім дистанційним кільцем. Кут контакту, за яким сприймається навантаження, становить $10...17^\circ$. Допустиме радіальне навантаження у дворядних підшипників в 1,7 рази вище, ніж у аналогічних однорядних. Заданий зазор забезпечується підшліфування дистанційного кільця, встановленого між внутрішніми кільцями. Основне призначення подібної конструкції – сприйняття значних комбінованих на-

вантажень (в тому числі двосторонніх осьових) при жорсткій фіксації та малих обертах.

На підшипнику № 3 (див. рис. 5.22) (задній підшипник швидкохідного валу редуктора) кліті 8 тривалий проміжок часу спостерігався високий рівень віброприскорення ($\sim 10 \text{ м/с}^2$), на суміжному підшипнику № 5 також має місце підвищений рівень близько 3 м/с^2 (див. рис. 5.23).

Спектральний склад проблемного підшипника показує (рис. 5.24), що в спектрі домінує високочастотна складова (на частотах зачеплення зубчастої пари силового редуктора та її гармоніках $2,2 \dots 10,2 \text{ кГц}$), а також присутні підшипникові частоти ($0,02 \dots 2,2 \text{ кГц}$), які зміщуються в часі в зв'язку зі зміною швидкості прокату і наявністю періодичних ударних навантажень.

На підставі цієї інформації при проведенні найближчого ремонту були заплановані наступні ремонтні роботи по редуктору: перевірити стан робочих поверхонь зубів зубчастої пари силового редуктора; провести ревізію підшипника № 3 редуктора.



Рисунок 5.24 - Спектр віброприскорення підшипника № 3 кліті 8 до ремонту

За результатами розкриття корпусу редуктора був виявлений дефект роликів дворядного підшипника № 3 (серії 97773) – пошкодження внутрішнього дистанційного кільця (рис. 5.25).

З огляду на обмеження часу на ремонтні роботи, була проведена заміна швидкохідного валу редуктора з установкою нових підшипників.

На рис. 5.23 в таблиці представлені середні значення вібраційних параметрів до і після виконання ремонту: як видно з показань, на підшипниках № 3 і № 5 спостерігається низький рівень віброприскорення порядку $0,57 \text{ м/с}^2$ і $0,18 \text{ м/с}^2$ відповідно. Спектр віброприскорення на підшипнику № 3 кліті 8 після його заміни істотно змінився (рис. 5.26).



Рисунок 5.25 – Підшипник серії 97773: пошкодження внутрішнього дистанційного кільця; кліть № 8

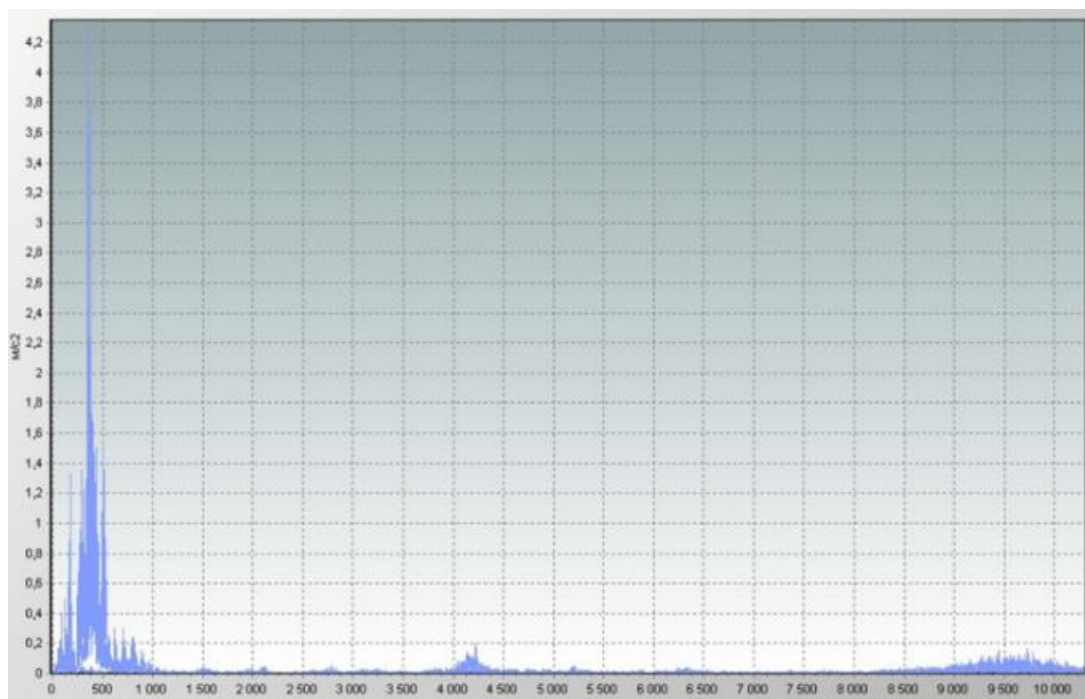


Рисунок 5.26 – Спектр віброприскорення підшипника № 3 кліть №8 після ремонту

Випадок 2. За результатами моніторингу на підшипнику № 5 кліті № 6 спостерігалось плавне зростання віброприскорення з $2,6 \text{ м/с}^2$ до $3,04 \text{ м/с}^2$, при цьому значення віброшвидкості знаходилося в межах норми та становило $0,7 \text{ мм/с}$ (рис. 5.27). У зв'язку з цим була видана рекомендація ремонтній службі провести ревізію підшипника № 5 редуктора при проведенні найближчого планово-попереджувального ремонту. В результаті огляду даного підшипника виявлено дефект сепаратора та прийнято рішення про його заміну (рис. 5.28).

Після заміни підшипника серії 97770 рівень віброприскорення знизився до нормативного значення $0,15 \text{ м/с}^2$, пріоритет – бездефектний експлуатаційний стан.



Рисунок 5.27 – Вібраційний стан вузла підшипника № 5, (ОУ: $>2,2 \text{ м/с}^2$, пік), вимагає вжиття заходів. Кліть № 6.



Рисунок 5.30 – Тренд віброприскорення підшипника № 4
до і після ремонту. Кліть № 4

При виконанні ревізії підшипника № 4 редуктора кліті 4 був виявлений проворот підшипника та виконана його заміна, після чого тренд вібрації фіксує зниження рівня віброприскорення в ~ 3 рази (рис. 5.30).

В системі передбачена можливість при необхідності переставляти датчики, встановлювати додаткові та аналізувати їх сигнали. Зокрема, на шестеренних клітях клітей № 5 та № 8 виконаний монтаж додаткових датчиків вібрації в аксіальному напрямку для контролю осьових навантажень з боку валу що веде редуктора. В якості експерименту на прокатні стійки кліті 7 встановлені додатково 4 датчика вібрації для контролю підшипників верхніх і нижніх пар робочих та опорних валків (рис. 5.31).

Це дозволить визначити можливість проведення гарантованого моніторингу та діагностики відповідальних вузлів валкової системи.

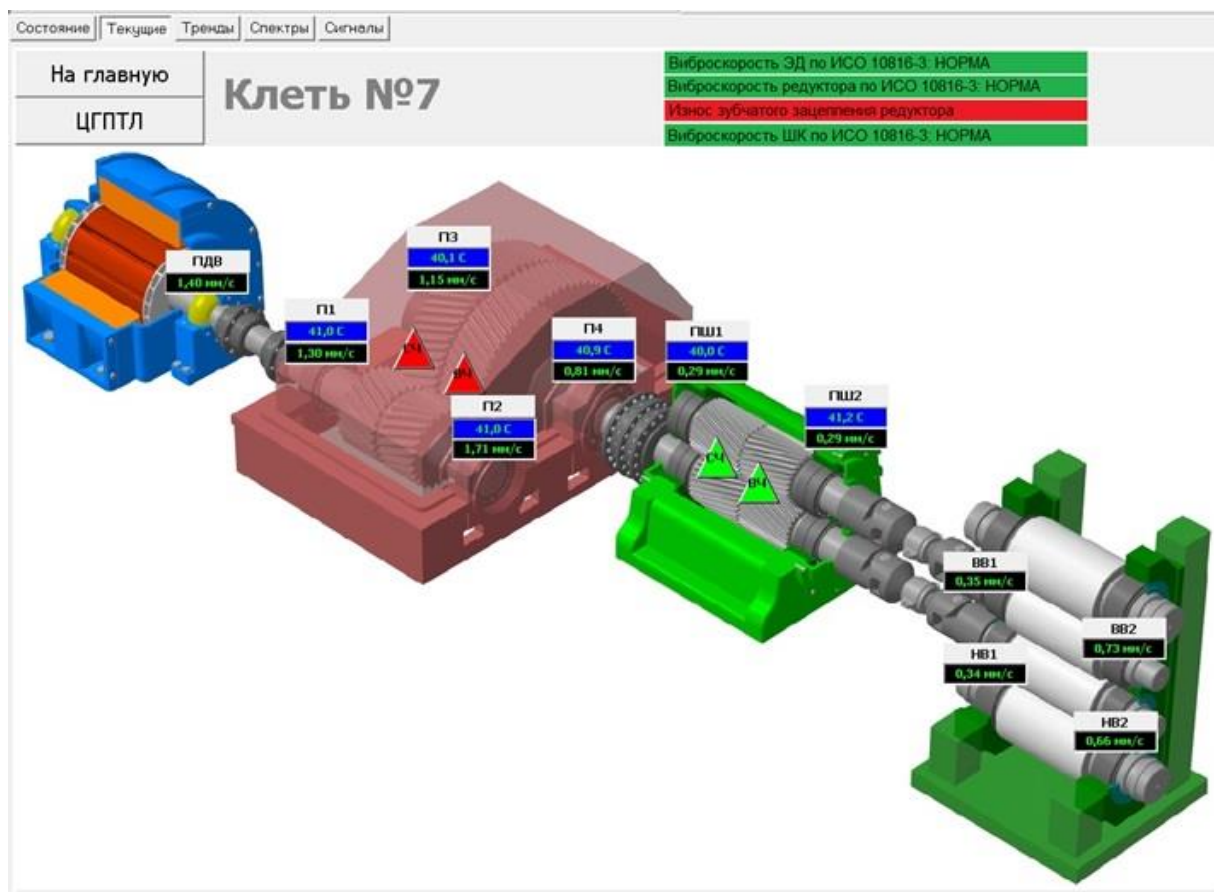


Рисунок 5.31 – Клеть № 7: візуалізація на моніторі АРМ поточних значень вібраційного стану кліті по віброшвидкості (ОУ, мм/с, СКЗ), температурі підшипників та результатами автоматичної діагностики системи.

5.5 Гранично допустимі рівні вібрацій

На підставі результатів натурних вимірювань встановлено гранично допустимі рівні вібрацій в різних вузлах прокатних клітей, які сигналізують обслуговуючому персоналу про неприпустимий знос елементів лінії приводу.

Результати натурних вимірювань гранично допустимих рівнів вібрацій в різних вузлах прокатних клітей стану БШШС 1680 наведено в табл. 5.1 – табл. 5.11.

В табл. 5.1 – табл. 5. 11. СКЗ віброшвидкості ($V_{скз}$) – середньоквадратичне значення віброшвидкості по ДСТУ 2300-93, а пік віброприскорення ($A_{пик}$) – пікове значення віброприскорення по ДСТУ 2300-93.

Таблиця № 5.1 – Значення границь зон технічного стану Кліть ДУО

Зона технічного стану (ЗТС)	Параметр	Границі
Електродвигун		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,8 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 2,5$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,5 \leq A_{пik}$
1-й редуктор		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik} < 2,5$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,5 \leq A_{пik}$
2-й редуктор		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 2,5$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,5 \leq A_{пik}$
Шестеренна кліть		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 2,5$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,5 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik}$

Таблиця № 5.2 – Значення границь зон технічного стану Кліть № 1

Зона технічного стану	Параметр	Границі
Електродвигун		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 2,5$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,5 \leq A_{пik}$
Швидкохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 2,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,8 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik} < 2,5$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,5 \leq A_{пik}$
Тихохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$
Шестеренна кліть		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$

Таблиця № 5.3 – Значення границь зон технічного стану Кліть № 2

Зона технічного стану	Параметр	Границі
Електродвигун		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 2,5$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,5 \leq A_{пik}$
Швидкохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik} < 2,5$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,5 \leq A_{пik}$
Тихохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,8$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,8 \leq V_{скз} < 2,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,8 \leq A_{пik} < 1,8$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,8 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,8 \leq A_{пik}$
Шестеренна кліть		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 0,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$0,8 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$

Таблиця № 5.4 – Значення границь зон технічного стану Кліть № 3

Зона технічного стану	Параметр	Границі
Електродвигун		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,5$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,8$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,5 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,8 \leq A_{пik} < 2,5$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,5 \leq A_{пik}$
Швидкохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 2,5$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,5 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik} < 2,5$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,5 \leq A_{пik}$
Тихохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$
Шестеренна кліть		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 0,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,3$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$0,8 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,3 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$

Таблиця № 5.5 – Значення границь зон технічного стану Кліть № 4

Зона технічного стану	Параметр	Границі
Електродвигун		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,5$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,9$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,5 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,9 \leq A_{пik} < 2,5$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,5 \leq A_{пik}$
Швидкохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 1,8$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,8 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,8 \leq A_{пik} < 2,5$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,5 \leq A_{пik}$
Тихохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$
Шестеренна кліть		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,3$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,3 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$

Таблиця № 5.6 – Значення границь зон технічного стану Кліть № 5

Зона технічного стану	Параметр	Границі
Електродвигун		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 3,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$3,8 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik}$
Швидкохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik} < 2,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,2 \leq A_{пik}$
Тихохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,7$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,7 \leq A_{пik} < 2,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,2 \leq A_{пik}$
Шестеренна кліть		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 0,7$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,4$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$0,7 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,4 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$

Таблиця № 5.7 – Значення границь зон технічного стану Кліть № 6

Зона технічного стану	Параметр	Границі
Електродвигун		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 0,7$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,4$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$0,7 \leq V_{скз} < 3,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$3,8 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik}$
Швидкохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 2,2$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,2 \leq A_{пik} < 3,8$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$3,8 \leq A_{пik}$
Тихохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,7$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,8 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,7 \leq A_{пik} < 2,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,2 \leq A_{пik}$
Шестеренна кліть		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 0,7$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,4$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$0,7 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,4 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$

Таблиця № 5.8 – Значення границь зон технічного стану Кліть № 7

Зона технічного стану	Параметр	Границі
Електродвигун		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,4$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,8 \leq V_{скз} < 3,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,4 \leq A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$3,8 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik}$
Швидкохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 1,8$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,8 \leq A_{пik} < 3,8$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$3,8 \leq A_{пik}$
Тихохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,7$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,8 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,7 \leq A_{пik} < 2,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,2 \leq A_{пik}$
Шестеренна кліть		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 0,5$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,3$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$0,5 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,3 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$

Таблиця №5.9 – Значення границь зон технічного стану Кліть № 8

Зона технічного стану	Параметр	Границі
Електродвигун		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,5$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 3,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,5 \leq A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$3,8 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik}$
Швидкохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 2,2$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,8 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,2 \leq A_{пik} < 3,8$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$3,8 \leq A_{пik}$
Тихохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik} < 3,8$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$3,8 \leq A_{пik}$
Шестеренна кліть		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 0,7$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,3$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$0,7 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,3 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$

Таблиця № 5.10 – Значення границь зон технічного стану Кліть № 9

Зона технічного стану	Параметр	Границі
Електродвигун		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 0,7$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,4$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$0,7 \leq V_{скз} < 3,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,4 \leq A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$3,8 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik}$
Швидкохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik} < 3,8$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$3,8 \leq A_{пik}$
Тихохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,7$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,7 \leq A_{пik} < 2,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,2 \leq A_{пik}$
Шестеренна кліть		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 0,7$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,3$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$0,7 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,3 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$

Таблиця № 5.11 – Значення границь зон технічного стану Кліть № 10

Зона технічного стану	Параметр	Границі
Електродвигун		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 0,7$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,4$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$0,7 \leq V_{скз} < 3,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,4 \leq A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$3,8 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik}$
Швидкохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 1,2$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,8 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,2 \leq A_{пik} < 3,8$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$3,8 \leq A_{пik}$
Тихохідний вал редуктора		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,8$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,7$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,8 \leq V_{скз} < 4,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,7 \leq A_{пik} < 2,2$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$4,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$2,2 \leq A_{пik}$
Шестеренна кліть		
ЗТС «Допустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$V_{скз} < 1,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$A_{пik} < 0,3$
ЗТС «Потребує прийняття мір»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$1,2 \leq V_{скз} < 2,2$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$0,3 \leq A_{пik} < 1,1$
ЗТС «Недопустимо»	СКЗ Віброшвидкості $V_{скз}$ мм/с	$2,2 \leq V_{скз}$
	ПІК Віброприскорення $A_{пik}$ м/с ²	$1,1 \leq A_{пik}$

5.6 Ефективність застосування системи на стані 1680

В умовах жорстокої конкуренції та кризових явищ в економіці інструменти, котрі дозволяють збільшити економічну ефективність виробництва, є одним з основних чинників до фінансового благополуччя підприємства [44]. Досить значне місце в статті витрат кожного металургійного підприємства займає експлуатація обладнання. При цьому несправності обладнання, що виникають в ході виробничого процесу, є подіями, які ведуть за собою значні витрати. Одним з найбільш інформативних методів неруйнівного контролю що застосовується для діагностики працюючого обладнання є вібродіагностика [110, 111].

Економічний ефект від використання засобів вібраційного діагностики складається з прямої і непрямой економії. В даному випадку до прямої економії відносяться наступні позитивні ефекти: зниження витрат на ремонт обладнання; збільшення міжремонтних інтервалів; зниження витрат на запасні частини; зниження трудовитрат; скорочення витрат на ремонти за рахунок проведення цілеспрямованого технічного обслуговування (за результатами діагностики); зниження витрат від виникнення непланових простоїв.

Також важливу роль відіграє виникнення непрямой економії яка складається за рахунок зниження витрат, не пов'язаних безпосередньо з виробничими витратами. До таких витрат відносяться: витрати пов'язані з ліквідацією аварій; витрати які виникають при виробництві браку; витрати на енергоресурси (підвищене споживання електроенергії та ін.).

Система, встановлена на всіх одинадцяти клітках БШШС 1680 виконує безперервний моніторинг ТС підшипникових опор, електродвигунів, редукторів, шестеренних клітей та зубчастих зачеплень, розпізнає дефекти що зароджуються. Система побудована таким чином, що в будь-який момент часу роботи стана обслуговуючий та управлінський персонал цеху можуть спостерігати значення вібраційних параметрів у всіх вузлах на робочому та холостому режимах обертання і в разі необхідності приймати відповідні рішення.

Ефективна робота діагностичного модуля системи «Корунд» на стані 1680 ПрАТ «Запоріжсталь» дозволила своєчасно виявити дефекти на прокатних клітках та оперативно виконати ремонтні роботи без зниження продуктивності стану. Технічні фахівці ПрАТ «Запоріжсталь» по заслугам оцінили високу достовірність результатів діагностування стаціонарного комплексу КОРУНД, що дозволило їм підвищити надійність обладнання та заощадити кошти підприємства (додаток А).

Загальний економічний ефект від запобігання простоїв.

Вартість системи для БШШС 1680 ЦГПТЛ ПрАТ «Запоріжсталь» становить близько 4 млн. грн. За 2020 рік стаціонарною системою діагностики підтверджено запобігання простоїв стану 1680 ЦГПТЛ ПрАТ «Запоріжсталь» в кількості 8 шт. (табл. 5.12). Підтверджений економічний ефект по кожному запобіганню простоїв обладнання визначався

$$S = T_{\text{пр}} \cdot Q_{\text{об}} \cdot \Delta\P, \quad (5.1.)$$

де, $T_{\text{пр}}$ – орієнтовний час простою обладнання стана; $Q_{\text{об}} = 490$ т/год – середня годинна продуктивність БШШС 1680 ПрАТ «Запоріжсталь»; $\Delta\P = 125\$/\text{т} \cdot 27\text{грн.}/\$ = 3375\text{грн.}/\text{т}$ – середній маржинальний прибуток по ГКР за 2019 рік.

Загальний економічний ефект від запобігання простоїв близько 11 млн. грн. на рік.

Так само до впровадження стаціонарної системи діагностики додалися комплексні заходи, що сприяють зниженню витрати підшипників опорних валків і як наслідок зниження витрат на закупку підшипників: контроль операторами рівня вібрації під час прокатки та оперативного підстроювання стану; контроль рівня вібрації на заході смуги і т.п.; заміна номенклатури підшипника (тобто заміна виробника підшипника з заміною конструкції для підвищення здатності навантаження; заміна сепаратора на осях на суцільний (шестеренні кліті).

Таблиця 5.12 – Підтверджені стаціонарною системою діагностики КОРУНД випадки запобігання простоїв БШШС 1680 ЦГПТЛ ПрАТ «Запоріжсталь» за 2020 рік

Дата фіксації	Вузол	Підтверджений економічний ефект S, тис. грн.	Орієнтовний час запобігання простою, година
21.01.2020	Кліть №6 (відхилення ТС підшипника нижнього опорного валка)	1786,05	1,08
18.05.2020	Кліть №1 (відхилення ТС підшипника силового редуктора №4)	661,5	30 (на заміну вузла СР) 0,4 (вивід з роботи кліті)
23.05.2020	Кліть №9 (відхилення ТС підшипника нижнього опорного валка)	1786,05	1,08
04.08.2020	Кліть №8 (відхилення ТС підшипника опорного валка)	1786,05	1,08
17.08.2020	Кліть №9 (відхилення ТС підшипника нижнього опорного валка)	1786,05	1,08
17.08.2020	Кліть №1 (підшипник №1 шестеренної кліті)	661,5	18 (на заміну вузла ШК) 0,4 (вивід з роботи кліті)
23.09.2020	Кліть №5 (підшипник №1 шестеренної кліті)	661,5	12 (на заміну вузла ШК) 0,25 (вивід з роботи кліті)
22.12.2020	Кліть №8 (відхилення ТС підшипника опорного валка)	1786,05	1,08

Витрата підшипників опорних валків чистової кліті:

2018 рік – витрата підшипників 50 штук на суму близько 15 млн. грн.

2019 рік – витрата підшипників 63 штук на суму близько 18 млн. грн.

2020 рік (установка датчиків на опорні валки чистових клітей № 5 - № 10)
– витрата підшипників 25 штук на суму близько 7,5 млн грн.

$$Б = 18 \text{ млн.грн.} - 7,5 \text{ млн.грн.} = 10,5 \text{ млн.грн.}$$

Витрата підшипників шестеренних клітей:

2019 рік – витрата підшипників 15 штук на загальну суму 5 млн. грн.

2020 рік – витрата підшипників 3 шт. на загальну суму 1,2 млн. грн.

$$Б = 5 \text{ млн.грн.} - 1,2 \text{ млн.грн.} = 3,8 \text{ млн.грн.}$$

Загальний економічний ефект від комплексних заходів близько 25 млн. грн.

21.01.2020 року. Кліть № 6. Відхилення ТС підшипника нижнього опорного валка (рис. 5.32).

Дії персоналу: виконана перевалка опорних валків.

Причина: деформація та відколи на тілах кочення (рис. 5.33).

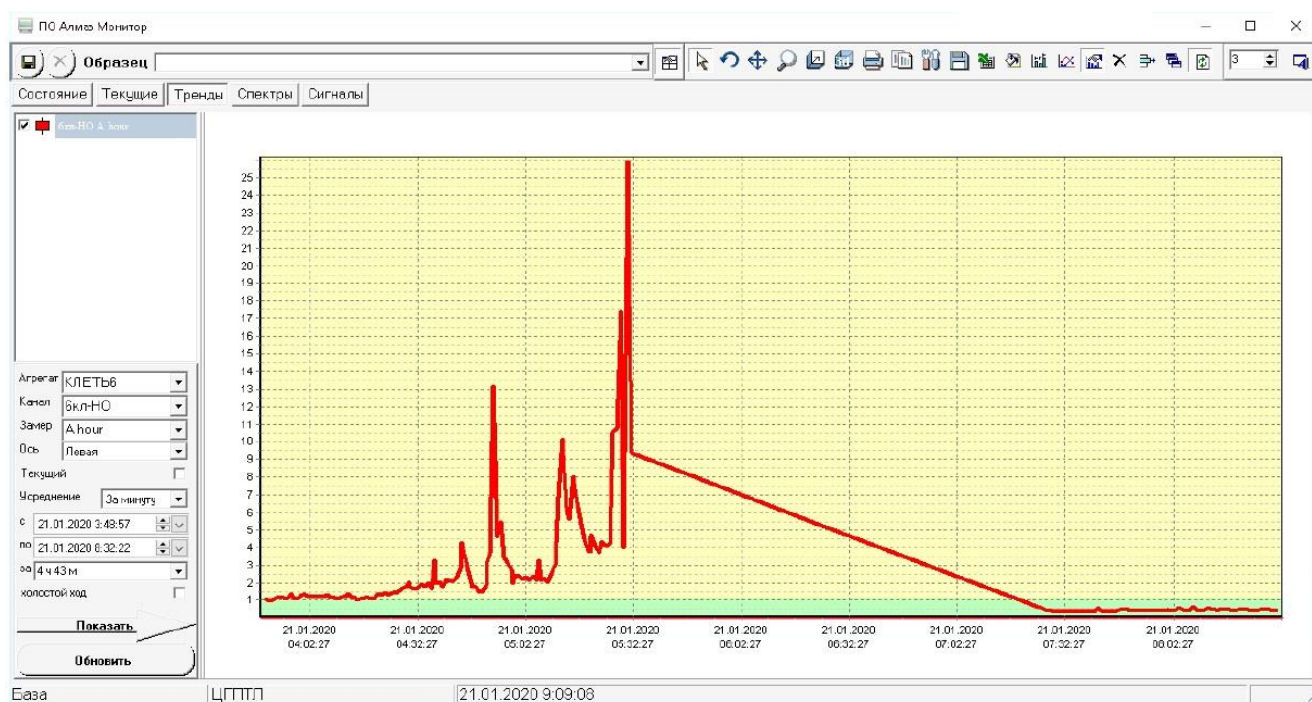


Рисунок 5.32 – Тренд вібрації до та після перевалки опорних валків



Рисунок 5.33 – Деформація та відколи на тілах кочення

18.05.2020 року. Кліть №1. Відхилення ТС стану підшипника силового редуктора №4 (рис. 5.34).

Дії персоналу: виконано заміну підшипника в ППР.

Причина: деформація та відколи на зовнішньому кільці підшипника (рис.5.35).

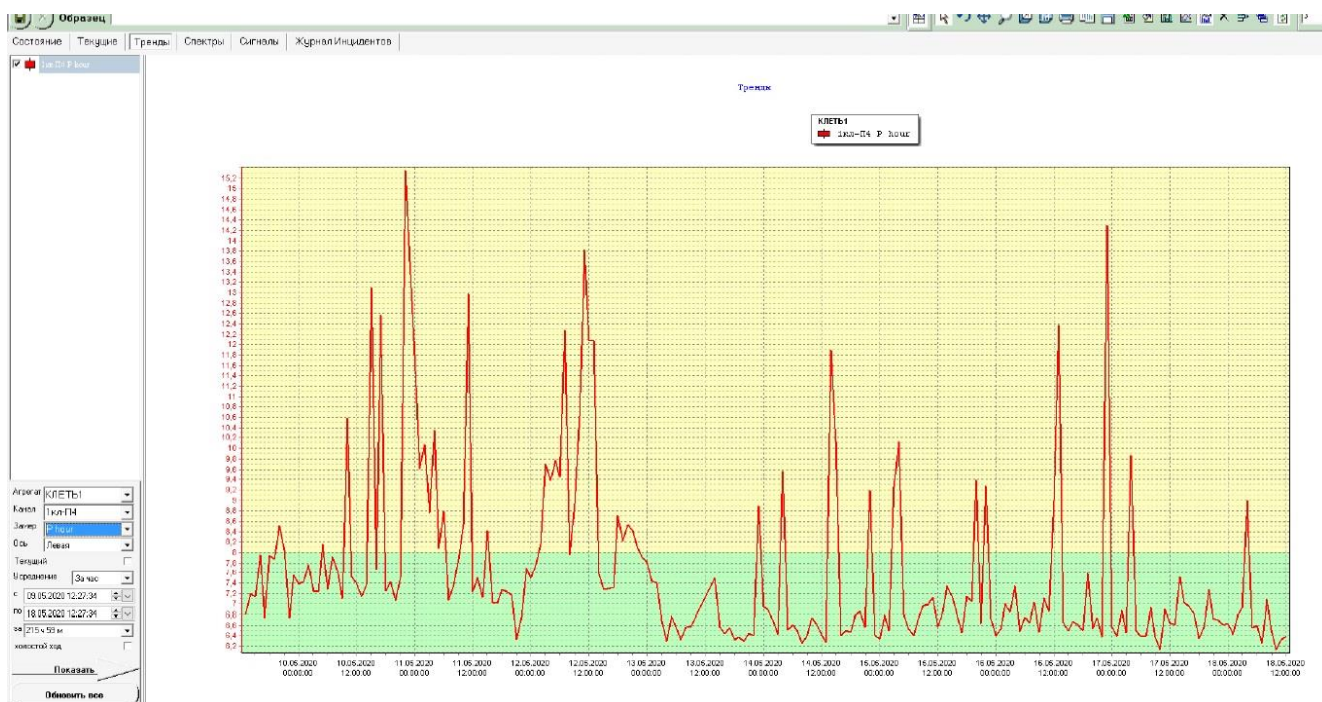


Рисунок 5.34 – Тренд вібрації дефектного підшипника



Рисунок 5.35 – Деформація та відколи на зовнішньому кільці підшипника

23.05.2020 року. Кліть № 9. Відхилення ТС підшипника нижнього опорного валка (рис. 5.36).

Дії персоналу: виконана перевалка опорних валків.

Причина: деформація та відколи на тілах кочення (рис.5.37).

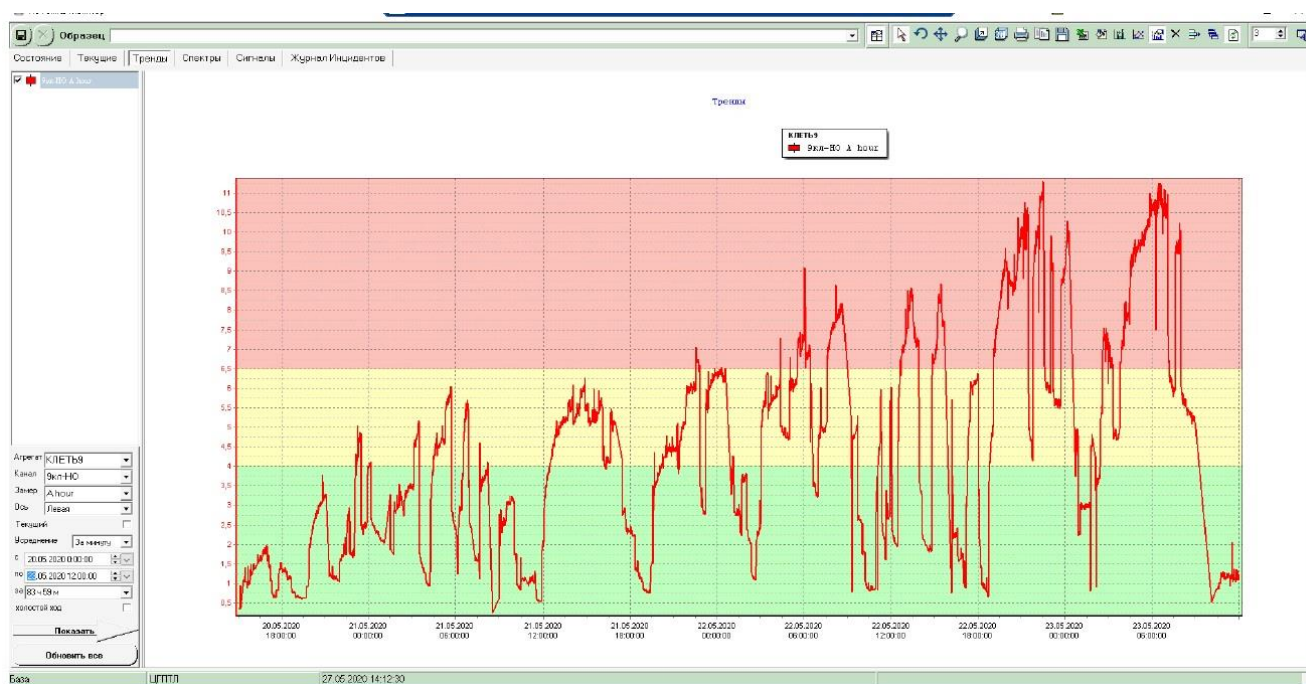


Рисунок 5.36 – Тренд вібрації до та після перевалки опорних валків

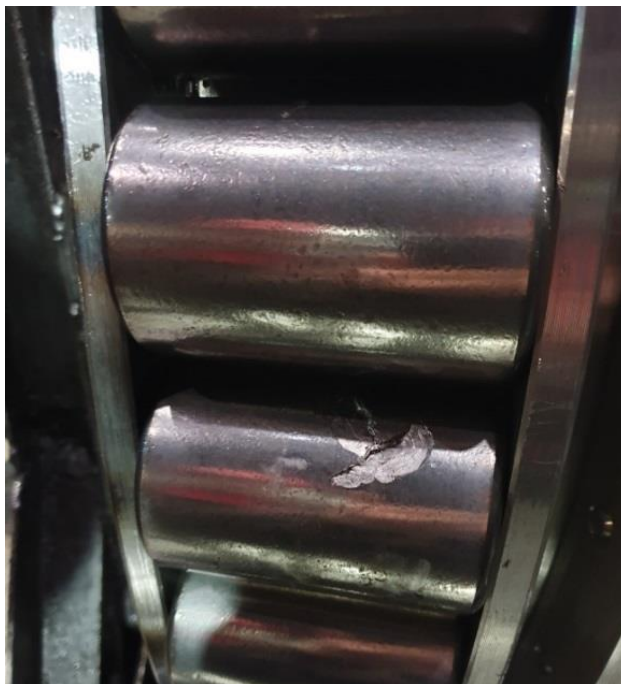


Рисунок 5.37 – Деформація та відколи на тілах кочення

04.08.2020 року. Кліть №8. Відхилення ТС підшипника опорного валка (рис. 5.38).

Дії персоналу: виконано заміну підшипника в ППР.

Причина: деформація та відколи на тілах кочення підшипника (рис. 5.39).

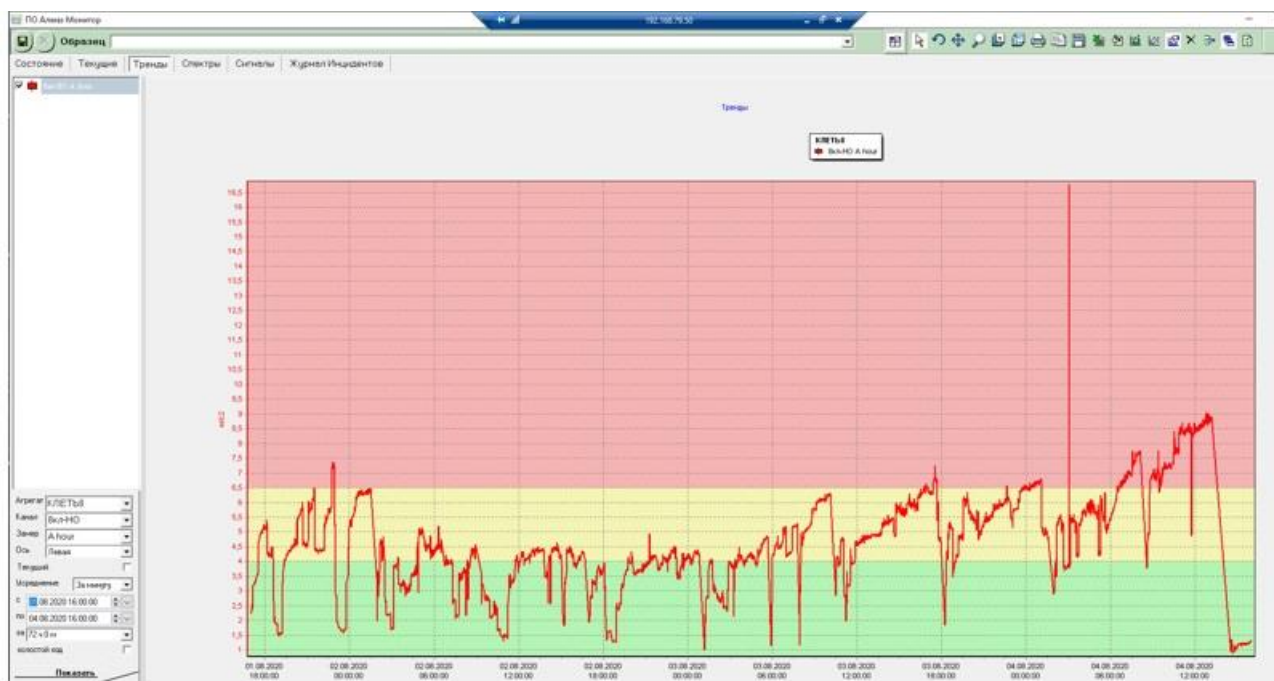


Рисунок 5.38 – Тренд вібрації до та після перевалки опорних валків



Рисунок 5.39 – Деформація та відколи на тілах кочення підшипника

17.08.2020 року. Кліть № 9. Відхилення ТС підшипника нижнього опорного валка (рис. 5.40).

Дії персоналу: виконано заміну підшипника в ППР.

Причина: деформація та відколи на тілах кочення підшипника (рис. 5.41).

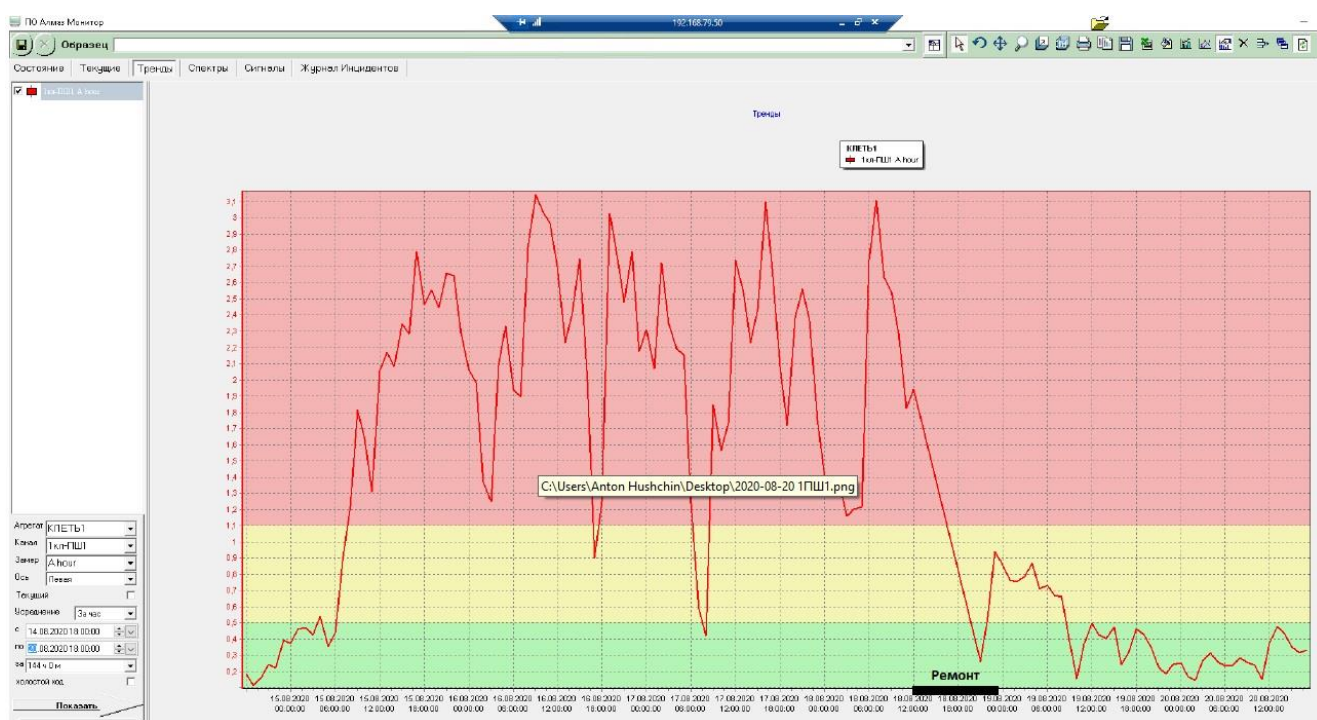


Рисунок 5.40 – Тренд вібрації до та після заміни підшипника

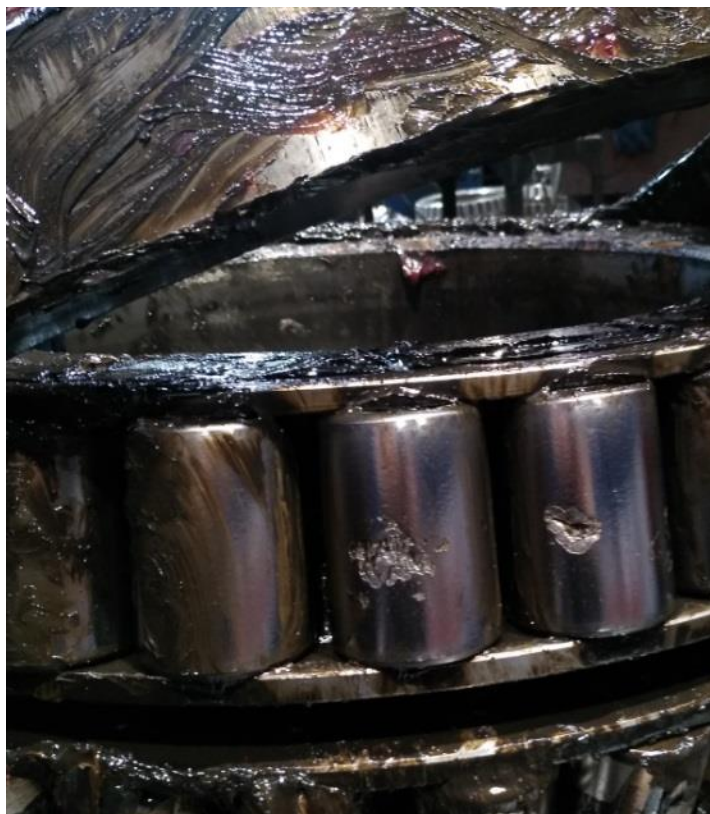


Рисунок 5.41 - Деформація та відколи на тілах кочення підшипника

17.08.2020 року. Кліть №1. Підшипник №1 шестеренної кліті (рис.5.42).

Дії персоналу: виконана перевалка опорних валків.

Причина: деформація та відколи на тілах кочення (рис.5.43).



Рисунок 5.42 – Тренд вібрації дефектного підшипника



Рисунок 5.43 – Деформація та відколи на тілах кочення

23.09.2020 року. Кліть №5. Підшипник №1 шестеренної кліті (рис. 5.44).

Дії персоналу: виконано заміну підшипника в ППР.

Причина: руйнування тіл кочення підшипника (рис. 5.45).

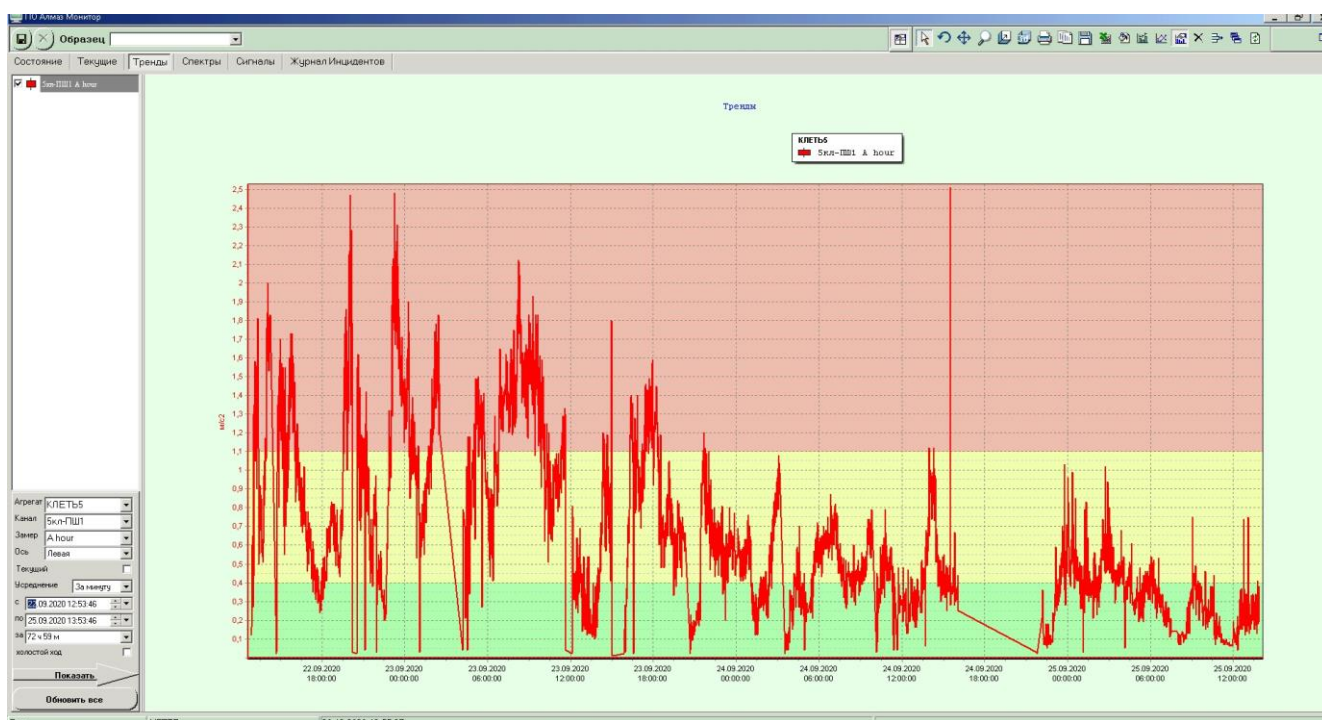


Рисунок 5.44 – Тренд вібрації до та після заміни підшипника



Рисунок 5.45 – Руйнування тіл кочення підшипника

22.12.2020 року. Кліть №8. Відхилення ТС підшипника опорного валка (рис.5.46).

Дії персоналу: виконана перевалка опорних валків.

Причина: деформація та відколи на тілах кочення і зовнішньому кільці (рис.5.47).



Рисунок 5.46 – Тренд вібрації до та після перевалки опорних валків



а)



б)

Рисунок 5.47 – Деформація та відколи на тілах кочення (а)
і зовнішньому кільці (б).

5.7 Висновки

1. Розроблена система діагностування для прокатного стана на основі контролю вібрації корпусного обладнання, виконує автоматичну діагностику, як в процесі прокатки, так і в режимі холостого ходу, визначає стан підшипників і зубчастих зачеплень редукторів, з'єднувальних муфт та шестеренних клітей.

2. Об'єктивна інформація, що надається системою, про ТС устаткування дозволяє планувати періоди ремонту та технічного обслуговування клітей.

3. Можливість оптимізації використання запланованих фінансових коштів і робочого часу ремонтного персоналу на підтримку обладнання в працездатному стані.

4. Комплексний підхід до вирішення питання безпеки виробництва забезпечує поліпшення умов праці оперативного персоналу металургійного комбінату, зниження виробничого браку та зниження витрат на ремонти обладнання.

Результати, викладені в розділі, опубліковані в роботах [102, 103, 108,109, 110, 111].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача розробки способів, методів, принципів і систем вібраційного моніторингу та діагностування технічного стану обладнання клітей безперервного широкоштабового стану гарячої прокатки, що в кінцевому результаті забезпечило підвищення надійності контрольованого обладнання. Найбільш повну інформацію про стан механічних вузлів забезпечують системи поточного моніторингу вібрації і діагностування обладнання.

Основні наукові і практичні результати полягають у наступному:

1. Для корпусного обладнання лінії приводу кожної кліті багатоклітьового безперервного стану шляхом вимірювань отримані дані про вібраційне поле у вигляді реалізації віброшвидкості в 7-9 точках під час робочого і холостого режиму, гістограм та середнє квадратичне відхилення. Для прокатних станів встановлені особливості зміни розмаху вібрацій в точках вібраційного поля з урахуванням стану обладнання, встановлені граничні значення вібропараметрів.

2. Встановлений статистичний зв'язок відносного часу запізнювання реакції ділянок лінії приводу від часу напрацювання шпинделів (зносу бронзових вкладишів) з урахуванням прокатаного сортаменту. Визначено граничні кількісні значення часу запізнювання, при досягненні яких рекомендується проведення технічного обслуговування.

3. Обґрунтована та розроблена концепція визначення технічного стану обладнання за допомогою діагностичних ознак, які отримують для двох режимів роботи стану: а) захоплення смуги валками і б) сталий режим роботи. Встановлено критерії, коли пріоритет у визначенні технічного стану віддається режиму а) або б). Це дозволяє підвищити достовірність діагностування.

4. Встановлено, що є взаємно кореляційний зв'язок вібраційних процесів між точками вимірювань, розташованих на значній відстані один від одного (наприклад, вхід і вихід редуктора та шестеренній кліті). Ступінь цього зв'язку різна під час робочого (під навантаженням) і холостого ходу при одній і тій же частоті обе-

ртання та залежить від технічного стану редуктора і шестеренній кліті і є діагностичною ознакою.

5. Встановлено, що максимальне значення розмаху віброшвидкості корпусного обладнання редуктора і шестеренній кліті під час захоплення смуги валками статистично пов'язано з технічним станом (зносом бронзових вкладишів) шпиндельного зчленування і є діагностичною ознакою. До такого ознаку відноситься також вид гістограми розподілу амплітуди віброшвидкості, виміряної протягом прокатки всієї смуги, і значення середньоквадратичного відхилення. Встановлена кореляційна залежність максимального розмаху віброшвидкості при захопленні смуги валками від статичного моменту прокатки на валу двигуна.

6. Встановлена залежність часу поширення ударного імпульсу через смугу що прокочується до попередньої кліті з урахуванням температури металу і міжклітьової відстані. Це дозволяє використовувати дану залежність для оцінки стану технології і обладнання.

7. Обґрунтовані, розроблені та випробувані нові способи діагностування. Удосконалено методи оцінки та розпізнавання технічного стану обладнання.

8. Запропонована обґрунтована методика вибору періодів цілеспрямованих вібраційних вимірювань, коли в найбільшій мірі проявляється зв'язок діагностичних ознак зі станом обладнання, що сприяє підвищенню ефективності та достовірності процесу діагностування.

9. На підставі результатів натурних вимірювань встановлено гранично допустимі рівні вібрацій в різних вузлах прокатних клітей, які сигналізують обслуговуючому персоналу про неприпустимий знос елементів лінії приводу.

10. Впроваджена на прокатному стані 1680 система вібраційної діагностики з урахуванням особливостей конструкції, режимів роботи і технології забезпечує нормальну роботу стана шляхом моніторингу рівнів вібрації і попередження перед аварійних ситуацій, що дозволило підвищити ефективність роботи стану. Об'єктивна інформація, що надається системою, про технічний стан устаткування дозволяє планувати періоди ремонту та технічного обслуговування клітей.

11. Комплексний підхід до вирішення питання безпеки виробництва забезпечує поліпшення умов праці оперативного персоналу металургійного комбінату, зниження виробничого браку та зниження витрат на ремонти обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сафьян М.М. Прокатка широкополосной стали. М.: Металлургия, 1969. 460с.
2. Освоение технологии производства горячекатаных полос по схеме «слиток–сляб–рулон» при прямой транзитной прокатке на стане 1680 / В.Т. Тилик, О.Н. Штехно и др. *Производство проката*. 1998. № 8. С. 38–42.
3. Внедрение технологи производства горячекатаных полос по схеме «слиток–сляб–рулон» при прямой транзитной прокатке / В.Т.Тилик, О.Н. Штехно и др. *Труды четвертого конгресса прокатчиков: в 2 т.* М.: Черметинформация, 2001. Т. 1. С. 77–80.
4. Исследование и анализ технологических условий производства, обеспечивающих транзитную прокатку слябов на широкополосном стане 1680 / В.А. Сацкий, О.Н. Штехно и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1997. № 4. С. 28–31.
5. Николаев В.А. Путники А.Ю. Прокатка широкополосной стали. Киев: Освита України, 2009. 268 с.
6. Баглай А.В. Стаціонарні системи моніторингу технічного стану промислового обладнання металургійного виробництва. *Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики*: зб. матеріалів доп. учасн. XXII Міжнар. конф. Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2018. С. 30.
7. Баглай А.В. Развитие системы диагностики широкополосного стана. *Університетська наука – 2019*. зб. матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-техніч. конф. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. С. 69–71.
8. Надежность клетей главных линий НТЛС 1680 / О.Н. Клевцов, И.Г. Махницкий и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1999. №14. С.100–102.
9. Суворов И.К. Тиц Ю.В., Плахтин В.Д. Исследование надежности оборудования непрерывного широкополосного стана 1700 горячей прокатки. *Сталь*. 1976. №2. С. 152–155.

10. Анализ причин аварий оборудования листопрокатных станов и меры по их предупреждению / А.Ф. Крисанов, В.Ф. Кузерман и др. Обзор. информ. Ин-т «Черметинформация». Сер. «Эксплуатация и ремонт металлургического оборудования». М.: Институт «Черметинформация», 1985. 36 с.
11. Виды повреждений зубчатых передач металлургических приводов / В.В. Белоха, Б.П. Рябов и др. Обзор. информ. Ин-т «Черметинформация». Сер. «Эксплуатация и ремонт металлургического оборудования». Вып. 2. М.: Институт «Черметинформация», 1990. 15 с.
12. Мюллер В. Обзор повреждений в приводах прокатных станов. *Черные металлы*. 1996. № 25. С. 9-14.
13. Дерненбург Э.-О. Повреждения обмоток и коллекторов мощных прокатных двигателей. *Черные металлы*. 1974. № 20. С. 7–13.
14. Діагностування механічного обладнання металургійних підприємств: навч. посіб. / В.Я. Седуш, В.М. Кравченко та ін. Донецьк: Юго-Восток, 2004. 98 с.
15. Артюх В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах: монография. Мариуполь: ПГТУ, 2008. 244 с.
16. Большаков В.И., Поздняков В.П. Особенности эксплуатации оборудования главных линий черновых клетей стана 1680 горячей прокатки. *Защита металлургических машин от поломок*. 1999. Вып. 4. С. 15–24.
17. Артюх Г.В., Артюх В.Г., Артюх В.С. К вопросу защиты от поломок непрерывных широкополосных станов. *Защита металлургических машин от поломок*. 1998. Вып.3. С. 58–68.
18. Гайгемюллер Г. Клаппорт У., Лейтриц У. Диагностика агрегатов в прокатных цехах. *Черные металлы*. 1996. № 12. С. 48–50.
19. Хундхаузен Г. Усталостные разрушения трещин валков толстолистного стана. *Черные металлы*. 1974. № 20. С. 3–7.
20. Техническая диагностика механического оборудования: монография / В.А. Сидоров, В.М. Кравченко и др. Донецк: Юго-Восток, 2003. 125 с.
21. Веренев В.В., Большаков В.И., Путники А.Ю. Диагностика и динамика прокатных станов: монография. Днепр: ИМА-пресс, 2007 – 144 с.

22. Скичко П.Я. Пухальская А.Н. Кинематика универсального шпинделя прокатного стана. Динамика металлургических машин: Труды ИЧМ. Т. XXXI. М.: Металлургия, 1969. С.78–85.
23. Экспериментальное исследование кинематики узла рабочий валок – универсальный шпиндель в главной линии стана кварто / А.Н. Комаров, А.М. Пухальская и др. *Металлургия и коксохимия*. 1980. Вып.64. С.106–110.
24. Плахтин В.Д., Канев Н.Г. Повышение работоспособности зубчатых шпинделей прокатных станов. *Сталь*. 1987. № 7. С.53–55.
25. Сушко А.Е. Вибродиагностика в системах технического обслуживания по фактическому состоянию оборудования металлургических производств. *Вибрация машин. Измерение, снижение, защита*. 2005. № 1. С. 6–9.
26. Бодров В.В. Создание и внедрение систем вибродиагностики механического оборудования металлургических производств / В.В. Бодров, Б.А. Дубровский и др. *Труды четвертого конгресса прокатчиков. в 2 т.* М.: Черметинформация, 2001. Т. 1. С. 270–273.
27. Управление техническим состоянием машин по результатам диагностирования / В.Я. Седуш, В.А. Сидоров и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 5. С.86–88.
28. Роль технической диагностики в организации ремонтов на металлургических предприятиях. / В.Я. Седуш, С.И. Авакумов и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1998. № 4. С.32–34.
29. Fatigue Resistance Models of Structural for Risk Based Inspection / S. Belodedenko, V. Hanush and other. *Civil Engineering Journal*. 2020. Vol. 6. Issue 2. P. 375–383.
30. Білодієнко С.В., Баглай А.В., Гречаний О.М. Пошук функцій розподілу довговічностей для параметричних моделей. *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences: Book of Abstracts International research and practice conference*. Radom, Republic of Poland: Radom Academy of Economics, 2017. P. 102–106.

31. S. Belodedenko, G. Bilichenko, A. Baglay, A. Grechany Fatigue resistance models of structural for RBI-maintenance. *Proceedings of the 19th International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals: Book of Abstracts*. Porto: Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia, 2018. P. 77–78.
32. Хофман В., Айгнер Х. Уменьшение ряби при дрессировке стальных полос. *Черные металлы*. 1998. № 4. С. 85.
33. Устранение дефектов поверхности холоднокатаных листов, вызванных вибрациями рабочих клеток / Э.А. Гарбер, С.И. Павлов и др. *Сталь*. 2011. № 4. С. 36–41.
34. Йепсен У.Н., Кнеппе Г.К., Роде В. Системное моделирование станов горячей и холодной прокатки на примере исследования вибраций в непрерывных станах холодной прокатки. *Черные металлы*. 1996. № 8. С. 17–25.
35. Гризер Ф., Вебер Ф., Павельски О. Влияние микрогеометрии поверхности рабочих валков на качество холоднокатаной стальной полосы. *Черные металлы*. 1984. № 13. С. 11–19.
36. Теория возникновения и методы устранения на поверхности холоднокатаных автомобильных листов дефектов «поперечная ребристость» и «полосы нагартовки» / Э.А. Гарбер, С.И. Павлов и др. *Металлы*. 2009. № 1. С. 12–20.
37. Пименов В.А. Евсеев О.М., Колпаков С.С. Автоматическое диагностирование вибраций и управление скоростным режимом на стане 2030 холодной прокатки. *Производство проката*. 1999. № 11. С. 42–48.
38. Парцевский А.Б., Тарасова Л.К.. Диагностика металлургического оборудования на заводах Японии. *Бюллетень. Черная металлургия*. 1984. № 7. С.26–34.
39. Браун О.М. Экономические аспекты ремонтного обслуживания в черной металлургии. *Черные металлы*. 1988. № 1. С. 3–8.
40. Диагностика состояния высоконагруженных чистовых блоков проволочного стана / Ж. Пекельс, К. Миттен и др. *Черные металлы*. 1992. № 6. С. 36–41.
41. Шварц М., Вайсбурх Ф. Анализ работы оборудования на проволочном стане фирмы Вальцдрат Хохфельд. *Черные металлы*. 1996. № 1. С.30–37.

42. Аренс М. RoCoCo-модульная система наблюдений за работой прокатных установок. *Черные металлы*. 1999. № 3. С.18–23.
43. Мекел Дж., Геропп В., Аш А. Применение компьютеризированных систем наблюдения и диагностики на прокатных станах. *Черные металлы*. 1999. № 12. С. 53–60.
44. Бёттнер Д., Унгерер В. Возможности обеспечения качества путем контроля технологии и состояния оборудования на станах холодной прокатки. *Черные металлы*. 1997. № 12. С. 20–26.
45. Шефер Х.-Ю. Состояние диагностики машин в черной металлургии. *Черные металлы*. 2001. №6. С. 28–31.
46. Системы диагностики и мониторинга в черной металлургии / Х. Айгнер, Г. Хелекаль. и др. *Черные металлы*. 2001. №6. С. 41–45.
47. Zajicek H. Aigner H. Helekal G. Experience with plant wide condition monitoring at voestalpine Stahl. METEC Congress 2003: Proceedings 3rd European Rolling Conference ERC 2003, Düsseldorf, 16-20 June 2003. Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, С. 419-422.
48. Гёр Т., Люльф Г. Наблюдение за агрегатами в черной металлургии. *Черные металлы*. 2001. №6. С.36–40.
49. Хон В., Зеелигер А., Тимтнер К. Контроль работы главных приводов клетей на современных рельсобалочных станах. *Черные металлы*. 1996. № 4. С. 40–45.
50. Ульяницкий В.Н. Техническая диагностика металлургического оборудования: учеб. пособ. Алчевск: ДГМИ, 2004. – 186 с.
51. Кияновский Н.В. Новые разделы в теории и практике надежности машин: учеб. пособ. Кривой Рог: Минерал, 1998. 270 с.
52. Диагностирование линий привода клетей стана 1680 по времени запаздывания / Веренев В.В., Путноки А.Ю. и др. *Труды конгресса прокатчиков*. М.: Черметинформация, 2005. С. 133–137.

53. Спосіб визначення технічного стану устаткування крутильної системи лінії головного приводу прокатної кліті: пат. 70137 А Україна: МПК (2006) G01M 7/02. № 20031212642; заявл. 26.12.2003; опубл. 15.09.2004, Бюл. № 19.
54. Расширение возможностей вибродиагностирования оборудования прокатных клетей / Веренев В.В., Большаков В.И. и др. *Вибрация машин: измерение, снижение, защита*. 2005. № 1. Вып. 1. С. 14–16.
55. Спосіб визначення технічного стану зубчатого зачеплення редуктора лінії приводу прокатної кліті: пат. 86640 Україна: МПК (2009) G01M7/00, G01M13/00. № a200702387; заявл. 05.03.07; опубл. 12.05.09. Бюл. № 9.
56. Спосіб визначення технічного стану устаткування крутильної системи лінії головного приводу прокатної кліті: пат. 70137 А Україна: МПК (2006) G01M 7/02. № 20031212642; заявл. 26.12.2003; опубл. 15.09.2004, Бюл. № 19.
57. Спосіб визначення технічного стану ділянок лінії головного приводу першої кліті при безперервній прокатці заготовки у двох суміжних клітях: пат. 87575 Україна: МПК (2009) G01M7/00, G01M13/00. № а 200712228; заявл. 05.11.06; опубл. 27.07.2009. Бюл. № 14.
58. Тараканов В.М., Скворцов О.Б., Сушко А.Е. Системы непрерывного контроля по вибрационным параметрам. *Вибрация машин: измерение снижение защита*. 2006. № 3 С. 48–54.
59. Радчик И.И., Рябков В.М., Сушко А.Е. Комплексный подход к вопросам надежности работы основного и вспомогательного оборудования современного металлургического производства. *Оборудование. Технический альманах*. 2006. № 1. С. 24–28.
60. Веренев В.В. Динамические процессы в широкополосных станах горячей прокатки: монография. Днепр: Літограф, 2018. 158 с.
61. Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звеньями. Киев: Изд. АН УССР, 1961. 312 с.
62. Опыт исследования динамики главных приводов прокатных станов с учетом упругих связей и зазоров / С.Н.Кожевников, П.Я.Скичко и др. Динамика ме-

- таллургических машин: Труды ИЧМ. Т. XXXI. М.: Металлургия, 1969. С.5–13.
63. Кожевников С.Н., Большаков В.И. Взаимодействие упругих механических систем станины и привода машины при нагружении. *Теория механизмов и машин*. Харьков: ХГУ, 1970. вып.10. С.3–8.
64. Веренев В.В. Взаимосвязь колебательных процессов в упругих системах прокатной клетки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. № 5. С.100–103.
65. Веренев В.В., Баглай А.В., Кипин М.М. Динамика парциальных упругих систем прокатных клеток. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2018. № 7. С. 104–107.
66. Леепа И.И., Скичко П.Я. Резервы повышения производительности, долговечности оборудования и качества поверхности листа на станах холодной прокатки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1973. № 4. С. 74–75.
67. Кэшей А.М. Воулкер Ф.С., Смолли А.О. Динамический удар в прокатных станах. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения*. 1972. № 2. С.159–174.
68. Влияние зазоров на динамические нагрузки в главной линии стана 2800 / В.И. Большаков, С.Н. Кожевников и др. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1967. № 6. С.162–168.
69. Плахтин В.Д. Москвитин В.И., Симочкин А.М. Снижение динамических нагрузок при захвате полосы на широкополосном прокатном стане. *Бюллетень «Черная металлургия»*. 1983. № 10. С. 36–37.
70. Усуги Т. Хаяси К. Устройство для демпфирования горизонтальных ударных нагрузок и вибрации клетки на стане горячей прокатки. *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2005. № 6. С. 52–54.
71. Артюх В.С., Артюх Г.В. Принцип выбора защиты прокатных станов от перегрузок и поломок. *Защита металлургических машин от поломок*. 1979. № 1. С. 30–52.

72. Артюх В.Г. Основы защиты металлургических машин от поломок: монография. Мариуполь: Издат. группа «Университет», 2015. 288 с.
73. Веренев В.В. Снижение динамических нагрузок и диагностика широкополосных станов в переходных режимах: монография. Никополь: СПД Фельдман О.О., 2014. 203 с.
74. Баглай А.В., Веренев В.В. Сравнительный диагностический анализ вибропереходных процессов в смежных прокатных клетях. *Системні технології*. 2018. Вип. 4. №117. С. 3–9.
75. Экспериментальное исследование энергосиловых параметров стана 2800 / М.М. Сафьян, Я.Д. Василев и др. Обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. ДМетИ. М.: Металлургия, 1971. Вып. 56. С. 145–154.
76. Веренев В.В., Баглай А.В. Взаимосвязь колебательных процессов в упругих системах линии привода и клетки. *Динамические процессы в широкополосных станах горячей прокатки*: монография / ред В.В. Веренев. Днепр: Літограф, 2018. Гл. 3, С. 29–43.
77. Баглай А.В., Кипин М.М., Дубина М.А. Вибрационная диагностика редуктора широкополосного прокатного стана 1680. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2019. № 1. С 53–57.
78. Баглай А.В., Веренев В.В. Сравнительный диагностический анализ вибропереходных процессов в смежных прокатных клетях. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ-2018*:зб. матеріалів доп. учасн. Х Міжнар. наук.-практич. конф. Дніпро: НМетАУ, 2018. С. 5.
79. Повышение точности листового проката: монография / И.Н. Меерович, А.И. Герцев и др. М.: Металлургия, 1969. 264 с.
80. Веренев В.В., Путноки А.Ю., Подобедов Н.И. Переходные процессы при непрерывной прокатке: монография. Днепр: Літограф, 2017. 116 с.
81. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов: монография. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.

82. Веренев В.В., Баглай А.В., Белодеденко С.В. Вопросы вибрационного диагностирования оборудования прокатных станов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2018. № 2. С. 59–62.
83. Веренев В.В., Баглай А.В., Белодеденко С.В. Особенности вибрационных измерений в прокатных клетях. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2018. № 3. С. 43–46.
84. Коновалов Л.В. Нагруженность, усталость, надежность деталей металлургических машин: монография. М.: Металлургия, 1981. 280 с.
85. Вибрация в технике. Справочник: в 6 т. М.: Машиностроение, 1981. Т. 5: Измерения и испытания / под. ред. М.Д.Генкина. 496 с.
86. Павлов Б.В. Акустическая диагностика механизмов: монография. М.: Машиностроение, 1971. 224 с.
87. Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680: монография. / В.В. Веренев, В.И. Большаков и др. Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. 184 с.
88. Повышение работоспособности прокатного оборудования за счет снижения динамических нагрузок / Б.Е. Житомирский, С.Д.Гарцман и др. М.: ЦНИИТЭИТяжМаш, 1982. Сер. Металлургическое оборудование. Вып. 33. – 47 с.
89. Баглай А.В. Зв'язок вібраційних процесів в устаткуванні з технологією гарячої прокатки. *Машини та технології обробки металів тиском*: зб. матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-техніч. конф. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 37–40.
90. Давыдов Е.А. Определение размеров трещин в сварных соединениях с помощью волн дифракции. *Автоматическая сварка*. 2008. № 3. С. 44–48.
91. Баглай А.В. Использование особенностей технологии и режимов работы прокатных клетей в диагностических целях. *Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану*: зб. матеріалів доп. учасн. XXIII Міжнар. конф. Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2020. С. 5.

92. Веренев В.В., Баглай А.В. Обратные удары в клетях прокатных станов. *Машины і пластична деформація металу*: зб. матеріалів доп. учасн. IV Міжнар. наук.-техніч. конф. Кам'янське: ДДТУ, 2018. С. 48.
93. Баглай А.В. Визначення технічного стану обладнання лінії приводу прокатних валків по швидкості расповсюдження ударного імпульсу. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM-2021*: зб. матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-практич. конф. Дніпро: НМетАУ, 2021. С. 21–24.
94. Баглай А.В. Використання особливостей технології та режимів роботи прокатних клітей з діагностичною метою. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2020. № 4. С 50–52.
95. Баглай А.В., Вереньов В.В. Динаміка та діагностика зазорів в клітях з багатонитковою прокаткою. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2020. № 3. С 58–60.
96. Баглай А.В., Веренев В.В. Динамика и диагностика зазоров в клетях с многониточной прокаткой. *Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану*: зб. матеріалів доп. учасн. XXIII Міжнар. конф. Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2020. С. 6.
97. Спосіб діагностики лінії головного приводу валків кліті з багатонитковою прокаткою: МПК (2020) B21B35/00, G01M13/02, G01H 3/02: заявка № а202003925 на пат. України; заявл. 30.06.2020; опубл. 25.09.2020, Бюл № 18 (Кн. 2). 37 с.
98. Баглай А.В. Диагностическая информативность вибраций корпусного оборудования линии привода прокатной клетки. *Приладобудування: стан і перспективи*: зб. матеріалів доп. учасн. XVI Міжнар. наук.-техніч. конф. Київ: НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, 2017. С. 109–110.
99. Бардин В.П., Петров Е.А., Стерник Ю.Л. Аналитическая оценка величины износа вкладышей универсальных шарниров шпинделей. Сб. тр. «Машины и агрегаты металлургического производства. М: ВНИИМЕТМАШ, 1984. С. 64–72.

100. Кравченко В.М. Смирнов В.А., Буцукин В.В. Знос лапасті універсального шпинделя прокатного стану. *Вісник Приазовського держного технічного університету. Серія: Технічні науки*. Маріуполь, 2012. Вип. 24. С. 262–265.
101. Жиркин Ю.В., Мишин Г.А., Лунькова С.М. Трибологические исследования шарниров универсальных шпинделей линии прокатных станов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1993. № 6. С. 73–75.
102. Vibrodiagnostics system for rolling mill equipment / A.V.Baglay M.M. Kipin and other. *Chernye Metally*. 2020 Vol. 2. P. 62–69.
103. Комплекс автоматической вибрационной диагностики оборудования прокатного стану / А.В.Баглай, А.Н.Гузеев и др. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2019. № 3. С 30–35.
104. Заруба М.С. Диагностика основного и вспомогательного металлургического оборудования как инструмент повышения эффективности производства. *Металлургическое оборудование и литейное производство*. 2016, № 9. С 94–97.
105. ГОСТ 20815-93 Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и более. Измерение, оценка и допустимые значения. [Чинний від 1997-12-30]. Изд. офиц. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 8 с.
106. ДСТУ ГОСТ ИСО 10816-3:2014 Вібрація. Контролювання стану машин за результатами вимірювання вібрації на необертових частинах. Частина 3. Промислові машини номінальною потужністю більше ніж 15 кВт і номінальною швидкістю від 120 хв-1 до 15000 хв-1. [Чинний від 2015-02-01]. Вид. офиц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 15с.
107. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин: монография. М.: Машиностроение, 1999. 344 с.
108. Баглай А.В. Вибрационное обследование стану 1150. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2017. № 1. С 54–57.
109. Баглай А.В., Кипин М.М. Системный подход к обеспечению надежности работы многоклетевых станов. *Інформаційні технології в металургії та ма-*

шинобудуванні. *ITMM-2020*: зб. матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-практич. конф. ім. проф. Михальова О.І. Дніпро: НМетАУ, 2020. С. 8–12.

110. Баглай А.В., Білодіденко С.В. Передові технології контролю якості виготовлення і ремонту для підприємств залізничного машинобудування. *Вісник сертифікації залізничного транспорту*. 2017. № 6. С. 18–23.
111. Баглай А.В., Кіпін М.М., Дубіна М.О. Впровадження автоматичної системи контролю та діагностики технічного стану вентиляторів газоочищення мартенівських печей. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2020. № 3. С 48–52.

**Публічне акціонерне товариство
Запорізький металургійний комбінат**

«ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

Південне шосе, 72,
м. Запоріжжя, 69008, Україна
Факс: (061) 213-18-58
E-mail: office@zaprizhstal.com

Додаток А

IBAN: UA733348510000026007962490637
в АТ «Перший Український Міжнародний Банк»,
МФО 334851

№ 1065827 від 16.06.2021

На № _____ від _____



Затверджую:

**Директор по інжинірингу
ПАТ «Запоріжсталь»**

М.В. Петряков

Відгук

про результати впровадження у виробництві Баглая А.В.

Відгук складено про те, що розроблені науково-технічні пропозиції (рішення) А.В. Баглая, викладені в дисертаційній роботі «Розвиток наукових основ визначення технічного стану прокатного обладнання за допомогою стаціонарної системи вібраційного моніторингу» прийняті до реалізації та впроваджені на широкоштабовому стані 1680 цеху гарячої прокатки тонкого листа в наступному обсязі:

1. Обґрунтовані допустимі значення часу запізнювання реакції вібродатчиків, встановлених уздовж лінії приводу, а також метод визначення їх по ділянках в результаті періодичних вібровимірювань, за якими на стані здійснюється діагностування (визначення) фактичного технічного стану обладнання та термінів його заміни.

2. Методика та правила періодів і термінів проведення раціональних з точки зору обсягу вимірювань вібрацій при захопленні смуги валками залежно від напруження і технічного стану двох ділянок - шпindelного та моторного (з урахуванням комбінацій їх стану і часу ремонтних впливів), за якими найбільш повно використовуються результати вимірювань і підвищується достовірність діагностування технічного стану.

3. На стані 1680 впроваджено спосіб діагностування стану обладнання, в основу якого покладено визначення швидкості поширення ударного імпульсу по ділянках уздовж лінії приводу від прокатної кліти до електродвигуна.

Начальник ВТДіМСО

М.О.Дубина

Публичное акционерное общество
Запорожский металлургический комбинат
«ЗАПОРОЖСТАЛЬ»

Южное шоссе, 72,
г. Запорожье, 69008, Украина
Факс: (061) 213-18-58
E-mail: office@zaporizhstal.com
Текущий счет № 26007962490637
в АО «Первый Украинский Международный Банк»,
МФО 334851

Додаток Б

№ 12031473 от 03.06.2019
На № _____ от _____

ДП «ДИАМЕХ-УКРАИНА»

Директору А.В. Баглай
факс: +38 (057) 714-04-08
e-mail: diamech@diamech.com.ua

*Отзыв о работе стационарной системы на
прокатном стане НТЛС-1680 в ЦГПТЛ
ПАО «Запорожсталь»*

Специалистами ДП «ДИАМЕХ-УКРАИНА» в 2017 году разработан проект, выполнена поставка, монтаж и наладка «Стационарного комплекса виброконтроля промышленного оборудования «КОРУНД» на прокатном стане НТЛС-1680 в ЦГПТЛ ПАО «Запорожсталь».

Система осуществляет в непрерывном режиме виброконтроль, мониторинг и диагностику технического состояния электродвигателей, силовых редукторов и шестеренных клеток. Оперативному персоналу представляется информация в удобном для анализа графическом виде: тренды, амплитудно-частотные характеристики, спектры и др. В системе настроена сигнализация при превышении пороговых уровней вибрации.

В процессе наладки и гарантийного обслуживания отлажена работа экспертного модуля системы, позволяющая в автоматическом режиме определять механические неисправности прокатного оборудования. Разработанная методика защитного мониторинга обеспечивает своевременное информирование обслуживающего персонала о начале необратимого развития дефекта с точностью до узла и минимизирует затраты на восстановительные ремонты. Благодаря использованию системы были своевременно обнаружены неисправности на силовых редукторах клетки №4, №6, №8 стана НТЛС-1680.

Эксплуатация системы с апреля 2017г. показала высокую достоверность результатов диагностирования, позволила повысить надежность оборудования, сэкономить средства предприятия и принять превентивную стратегию ТОиР.

Следует отметить, что экономический эффект от предотвращения простоев оборудования стана НТЛС-1680 составляет 11 млн. грн. в год, а экономический эффект от комплексных мероприятий - около 25 млн. грн.

**Директор по инжинирингу
ПАО «Запорожсталь»**



А.В. Жук

Исполнитель:
начальник ОТДиМСО
М.А. Дубина