



Чубик Р. В.

*Дрогобицький
державний
педагогічний
університет*

Зозуляк І. А.

Бандура В. М.

*Вінницький
національний
аграрний
університет*

УДК 62-521:62-868662-531.7

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЇ РЕЗОНАНСНОЇ ДВОХКОНТЕЙНЕРНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ СУШАРКИ

В статті представлено адаптивне устройство для сушки матеріала в виброкипящем слое который дает возможность расширения технологических возможностей и уменьшения энергозатрат на привод.

In the article an adaptive device is presented for drying of material in to vibroboiling layer which enables expansion of technological possibilities and diminishing of энергозатрат on a drive.

Актуальність питання. Зернова маса, як об'єкт зберігання і переробки, відрізняється неоднорідністю і мінливістю в часі, різними процесами які здійснюються в складових її частинах.

Найбільш важливим параметром, що визначає фізико-хімічні властивості зернової маси, є вологість. Від неї багато в чому залежать температура, свіжість зерна, а також його якість.

Саме тому таке значення набула сушка зерна, як технологічний процес, що забезпечує не тільки збереження зерна, але і поліпшення його якості.

Процес зерносушіння направлений як на досягнення кінцевих результатів (кількість і якість висушеного зерна, вирішення екологічних завдань), так і на економію всіх видів ресурсів (матеріальних і енергетичних).

Аналіз остатніх досліджень. Для сушки зерна успішно використовуються сушарки з виброкипячим шаром, незаперечною перевагою яких в порівнянні з іншими сушарками є розвинена поверхня контакту між частинками і сушильним агентом і інтенсивне випаровування вологи з матеріалу.

Останніми роками дослідження в області зерносушіння ведуться в наступних напрямках: дослідження і розробка нових методів сушки зерна чергуванням нагріву і охолодження; використання нових видів генераторів тепла і нетрадиційних джерел енергії; збереження і

поліпшення якості сушіння зерна різних культур відповідно до їх призначення; комплексна механізація, автоматизація регулювання і дистанційного контролю процесу сушки.

Мета роботи. Розширення технологічних можливостей та зменшення енергозатрат на привод вибросушарки.

Результати досліджень.

Адаптивний пристрій для сушки матеріалу у виброкипячому шарі (рис.1) складається із рами 1 на якій на пружній підвісці 2 встановлено корпус U – подібної форми 3. Корпус U – подібної форми складається із першої секції 4 та другої секції 5, на суміжній боковій стінці паралельних секцій U – подібної форми 11 закріплено давач вібрації 24. На корпусі U – подібної форми 3 розміщено приводи 6 керованого інерційного виброприводу секцій U – подібної форми котрі через муфти 7 та вали 9 передають крутний момент до дебалансних вантажів 8 керованих вібраторів. На корпусі U – подібної форми 3 по бокам розташовано додатковий вантаж 10, що дозволяє усунути вплив маси завантаження сипучого середовища секцій U – подібної форми насамосинхронізацію приводів. В першій U – подібній секції 4 корпусу 3 розташована завантажувальна горловина 14 та електротен 12, що розташований в центральній частині секції 4 корпусу U – подібної форми 3 та навпроти торцевої стінки до якої закріплена завантажувальна горловина 14.

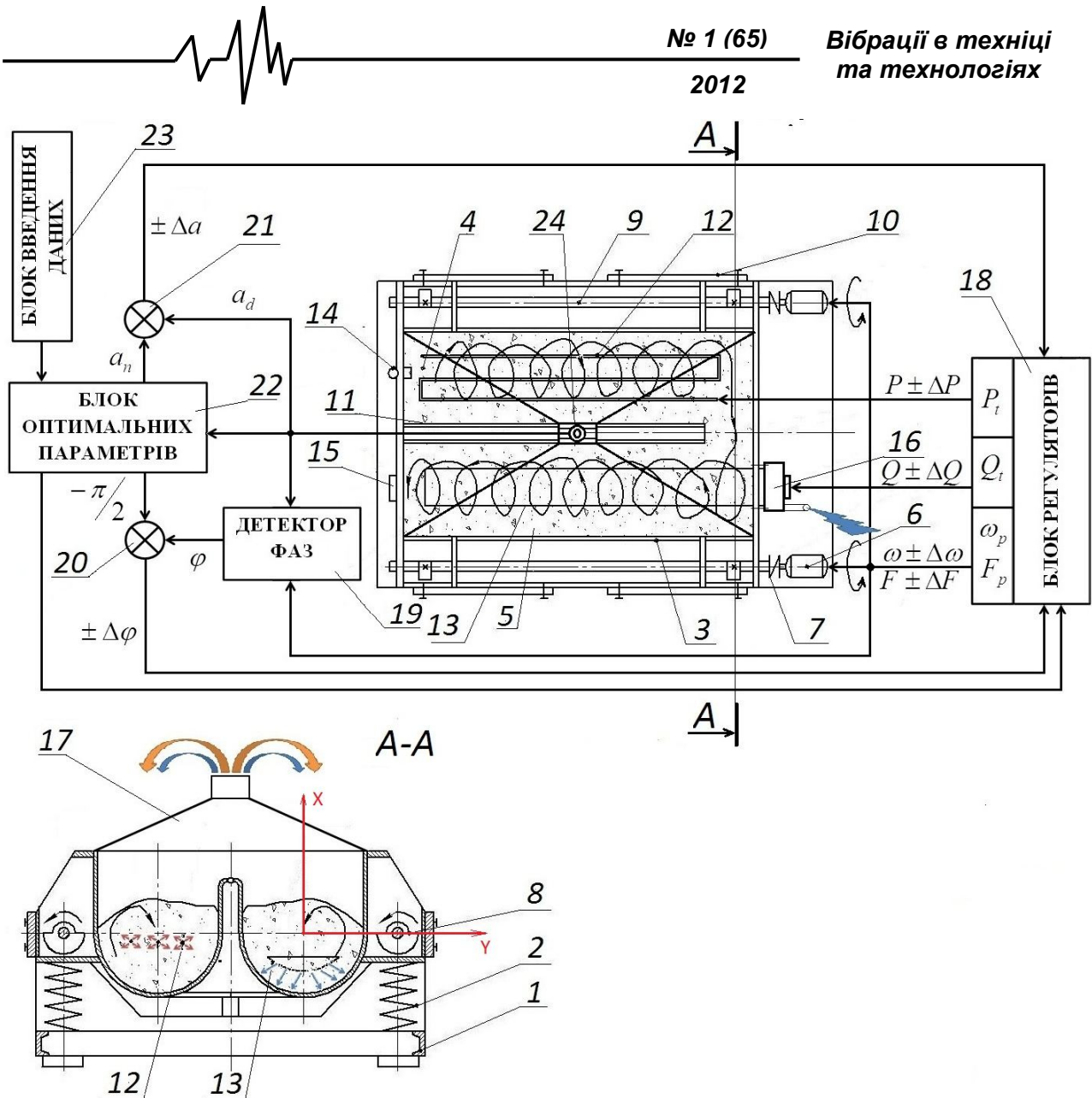


Рис. 1. Конструктивне рішення електромеханічної структури запропонованого адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі

В другій U – подібній секції 5 корпусу 3 розташована вивантажувальна горловина 15 та пустотілий патрубок 13 із газорозподілюючими отворами, до кінця пустотілого патрубка 13 пневматично під'єднаний повітряний насос 16, що закріплений на торцевій стінці корпусу U – подібної форми 3 навпроти торцевої стінки до якої закріплена вивантажувальна горловина 15. Корпус U – подібної форми 3 закривається газовивідною кришкою 17. Привода 6 керованих вібраторів електрично з'єднані із виходом блока регуляторів 18, також із відповідними виходами блока регуляторів 18 електрично з'єднані електротен 12 та повітряний насос 16. Давач вібрації 24 електрично з'єднаний із входами

блока оптимальних параметрів 22, детектором фаз 19 та першим компаратором 21. Інший вхід детектора фаз 19 електрично з'єднаний із приводами 6 керованих вібраторів, а вихід детектора фаз 19 електрично з'єднаний із входом другого компаратора 20. Два виходи блока оптимальних параметрів 22 електрично з'єднані із входами першого (21) та другого (20) компараторів, а виходи даних компараторів електрично з'єднані із входами блока регуляторів 18. Ще один вихід блока оптимальних параметрів 22 електрично з'єднаний із входом блока регуляторів 18, вхід блока оптимальних параметрів 22 електрично з'єднаний із виходом блока введення даних 23.

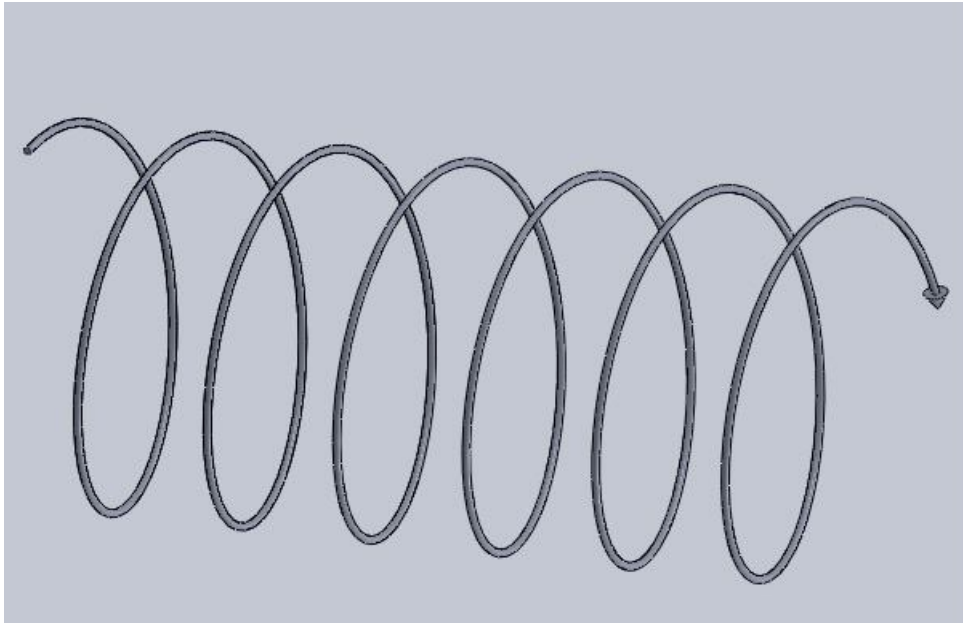
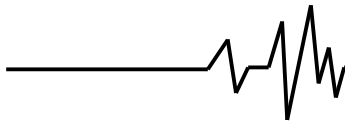


Рис. 2. Траєкторія руху зернового матеріалу в контейнері робочої камери

Адаптивний пристрій для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі працює наступним чином. Після запуску приводів 6 корпус U – подібної форми 3 разом із сипучим матеріалом в U – подібних секціях 4 та 5 починає здійснювати коливні рухи по коловій (еліптичній) траєкторії на частоті ω_p відмінній

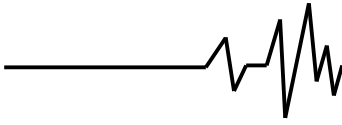
від власної резонансної ω_0 для коливної механічної системи запропонованого адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі. Коловий рух (еліптичний) будь якої точки корпус U – подібної форми 3 пояснюється том, що під дією керованого вібратора накладаються коливання в двох взаємно перпендикулярних напрямках X та Y , що знову ж таки обумовлено різною жорсткістю спіральних пружин (пружної підвіски 2) у вертикальному та горизонтальному напрямках і в результаті дійсне значення амплітуди

визначається
$$a_d = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$
 Стійкий

коливний рух по коловій (еліптичній) траєкторії корпусу U – подібної форми 3 досягається завдяки синхронній роботі керованих вібраторів, тобто завдяки самосинхронізації приводів 6. Для забезпечення самосинхронізації приводів у вібромашинах із аналогічною будовою корпусу (U – подібної форми) в роботах [3, 4, 5] використано додатковий вантаж. Зокрема в запропонованій конструкції адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі для

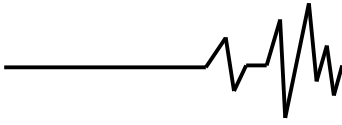
забезпечення самосинхронізації приводів 6 по бокам корпусу U – подібної форми 3 розташовано додатковий вантаж 10, відповідно до [3, 4, 5] це дозволяє усунути негативний вплив маси завантаження сипучого матеріалу в секціях 4 та 5 на самосинхронізацію приводів 6. На протязі декількох секунд роботи приводів 6 при сталій початковій частоті ω_p циклічної

вимушуючої сили F_p керованого вібратора (віброприводу) відбувається встановлення (врівноваження) амплітуди коливань корпус U – подібної форми 3. В результаті колових рухів сипучого матеріалу в U – подібних секціях 4 та 5 проходить перемішування сипучого матеріалу. За рахунок безперервної подачі сипучого матеріалу через завантажувальну горловину 14 відбувається процес ідеального витіснення, котрий відповідно до [6] полягає у поршневному переміщенню потоку сипучого матеріалу та повному перемішуванню в напрямі перпендикулярному до руху потоку сипучого матеріалу. Отже у встановившомуся режимі роботи адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі, в U – подібних секціях 4 та 5 проходить перемішування сипучого матеріалу по спіралеподібній траєкторії (рис. 2). Така форма руху сипучого матеріалу по секції 4 U – подібного корпусу забезпечують рівномірне прогрівання всього об'єму сипучого матеріалу електротеном 12. В результаті температурного градієнту в першій секції 4 U – подібного корпусу відповідно до [7] відбуватиметься



вилучення вологи із верхніх шарів елементів (елементарних частинок), що являються сипучим матеріалом. Відповідно до [7] при інтенсивному нагріванню вологого тіла (в нашому випадку елементарної частинки сипучого матеріалу) в його середині виникає надлишковий тиск через внутрішній опір тіла руху пари, що утворилась в результаті швидкого випаровування вологи. Тобто, при температурному градієнті в першій секції 4 U – подібного корпусу попри випаровування вологи із верхніх шарів, волога все ж таки залишається в центральних шарах елементарних частинок сипучого середовища. Для усунення даного недоліку технологічного процесу сушки температурним градієнтом у другій секції 5 U – подібного корпусу при перемішуванні сипучого матеріалу за допомогою пустотілого патрубку 13 із газорозподілюючими отворами та повітряного насосу 16 реалізовується технологічний процес конвективної сушки. Відповідно до [8] при конвективній сушці волога видалається із елементарних частинок сипучого матеріалу в результаті випаровування із верхніх шарів, а на зміну волозі, що випарувалась із центральних шарів елементарних частинок сипучого матеріалу переміщується волога під дією градієнта концентрації вологи. В результаті чого у встановившомуся режимі роботи (при сталій дійсній амплітуді a_d та частоті ω_d коливань) корпусу 3 U – подібної форми при перемішуванні сипучого матеріалу реалізовується технологічний процес сушки із температурним градієнтом та технологічний процес конвективної сушки. В процесі подачі сипучого матеріалу через завантажувальну горловину 14 (та одночасне вивантаження готової продукції через вивантажувальну горловину 15) відбувається постійна зміна маси корпусу 3 U – подібної форми, також але в меншій мірі, на зміну маси корпусу 3 U – подібної форми впливає постійне випаровування вологи. Також можлива зміна подачі кількості сипучого матеріалу (за одиницю часу) обумовлена зовнішніми факторами, зокрема зв'язком продуктивності запропонованого адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі із іншими технологічно пов'язаними машинами та процесами для котрих запропонований пристрій є лише одним елементом цілої структури. В будь якому випадку відповідно до [9, 10] зміна маси корпусу 3 U – подібної форми є причиною зміни власної резонансної частоти ω_0 коливної механічної системи запропонованого адаптивного пристрою для

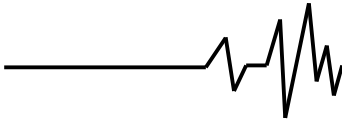
сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі. В свою чергу зміна власної резонансної частоти ω_0 коливної механічної системи при сталій початковій частоті ω_p циклічної вимушуючої сили F_p керованого віброприводу викличе зміну дійсної амплітуди a_d та фази φ коливань корпусу 3 U – подібної форми. Тобто адаптивний пристрій для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі почне віддалятися (або наближуватись) до власної резонансної частоти ω_0 завдяки зміні маси корпусу 3 U – подібної форми. Відповідно до [10] мінімально можливі енергозатрати на вібропривод можливі лише при постійному резонансному режимі роботи вібромашин, тобто коли частота ω_p циклічної вимушуючої сили керованого віброприводу рівна власній резонансній частоті ω_0 коливної механічної системи адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі. Зміну даних динамічних параметрів (дійсної амплітуди a_d та фази φ коливань) корпусу 3 U – подібної форми фіксує давач вібрації 24, що закріплений на суміжній боковій стінці 11 паралельних секцій U – подібної форми. Відповідно до [10] при резонансному режимі роботи існує відставання фази амплітуди коливань робочого органа (корпусу 3 U – подібної форми) від циклічної вимушуючої сили керованого віброприводу на $\pi/2$. Для того, щоб визначити в котру сторону і наскільки коливна механічна система відійшла від власної резонансної частоти ω_0 (при сталій ω_p) інформація від давача вібрації 24 поступає в детектор фаз 19, куди також поступає інформація від приводів 6 про фазу циклічної вимушуючої сили F_p керованого віброприводу. В результаті чого в детекторі фаз 19 постійно в реальному часі проводиться визначення зсуву фаз $\pm \varphi$ між амплітудою коливань корпусу 3 U – подібної форми та циклічною вимушуючою силою F_p керованого віброприводу. Тобто, при будь якій масі завантаження корпусу 3 U – подібної форми сипучим матеріалом та прибудь якій заданій технологічно оптимальній продуктивності адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі на виході детектора фаз 19 отримуємо зсув фаз $\pm \varphi$ котрий в



компараторі 20 порівнюється із $-\pi/2$ енергетично оптимальним значенням. В результаті такого порівняння на виході компаратора 20 отримується $\pm \Delta\varphi$ величина, що чітко та однозначно характеризує в котру сторону і на скільки коливна механічна система відійшла від власної резонансної частоти ω_0 (при сталій ω_p). На основі параметру $\pm \Delta\varphi$ блок регуляторів 18 формує поправку $\pm \Delta\omega$ частоти циклічної вимушеної сили F_p керованого віброприводу, тобто корегує так, щоб завжди була справедлива рівність $\omega_p \pm \Delta\omega = \omega_0$ забезпечуючи тим постійний резонансний режим роботи та мінімальні енергозатрати на привод запропонованого адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі.

Постійний резонансний режим роботи адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі супроводжується зміною частоти ω_0 та амплітуди a_d коливань корпусу 3 U – подібної форми. Даний корпус (3) виконує роботу по перемішуванню сипучого матеріалу (при заданому ідеальному витісненні тобто заданій технологічно оптимальній продуктивності) при технологічному процесі сушки із температурним градієнтом та технологічному процесі конвективної сушки. При заданому технологічно оптимальному часу перебування сипучого матеріалу в адаптивному пристрої для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі зміна динамічних параметрів (дійсної амплітуди a_d та власної резонансної частоти ω_0 , що рівна ω_p) може бути причиною недовиконання (перевиконання) роботи по перемішуванню сипучого матеріалу. У випадку недовиконання роботи по перемішуванню сипучий матеріал буде недосушеним, через недостатньо якісне перемішування та розділення елементарних складових частинок сипучого матеріалу по об'єму U – подібних секцій 4 та 5, що обумовить згустки та локальні об'єднання із підвищеною вологістю які пройдуть «необробленими» крізь температурний градієнт та конвективну сушку. У випадку перевиконання роботи по перемішуванню сипучий матеріал при стабільній подачі (продуктивності, витісненню) пройде задовгий шлях по витках спіралі (пройде по спіралі із більшим діаметром ніж потрібно для оптимальної сушки) тому довше буде

знаходитись в полі температурного градієнта та конвективної сушки, що негативно вплине на фізико-хімічні характеристики кінцевого продукту. Також слід врахувати той факт, що від динамічних параметрів частоти ω_0 та амплітуди a_d коливань корпусу 3 U – подібної форми залежить час перебування елементарної частинки сипучого матеріалу в корпусу 3 U – подібної форми та безпосередньо під дією температурного градієнта. Відповідно до [11], для того щоб стабілізувати роботу по перемішуванню сипучого матеріалу на заданому технологічно оптимальному рівні доцільно скористатись стабілізацією питомої потужності вібраційного поля (відома ще під назвою як інтегральний критерій оцінки рівності вібрацій різних частот [12, 13]) корпусу 3 U – подібної форми. Враховуючи, що питома потужність вібраційного поля корпусу 3 U – подібної форми це питома робота (над одиницею маси) за одиницю часу, то стабілізувавши її при будь яких a_d та ω_0 над одиницею сипучого матеріалу буде виконана задана робота за заданий технологічно оптимальний час сушки. Відповідно до [11], питома потужність вібраційного поля корпусу 3 U – подібної форми визначається як $(a_d)^2 \times (\omega_0)^3$. Якщо оптимальною є питома потужність вібраційного поля, що визначається як задана $(a_z)^2 \times (\omega_z)^3$, де a_z та ω_z задані технологічно оптимальні параметри вібраційного поля при яких на протязі заданого часу сушки отримуємо задане значення якості вихідної продукції. Тому, для того, щоб не змінилась питома потужність вібраційного поля необхідне значення амплітуди коливань a_n корпусу 3 U – подібної форми при мінімальних енергозатратах на вібропривод (тобто, при ω_0) можна легко вирахувати прирівнявши $(a_n)^2 \times (\omega_0)^3 = (a_z)^2 \times (\omega_z)^3$. Для того, щоб стабілізувати питому роботу вібраційного поля корпусу 3 U – подібної форми сигнал із давача вібрації 24 поступає в компаратор 21 те дійсне a_d значення амплітуди коливань корпусу 3 U – подібної форми (при даній резонансній частоті ω_0) порівнюється із необхідним значення амплітуди коливань a_n корпусу 3 U – подібної форми. Необхідне значення амплітуди коливань a_n корпусу 3 U – подібної форми безпосередньо в блоці оптимальних параметрів



22 обчислюється постійно (в реальному масштабі часу) за наступним законом

$a_n = \sqrt{(a_z)^2 \times (\omega_z)^3 / (\omega_0)^3}$. Всі технологічно оптимальні параметри, що стосуються енергетичних режимів роботи пристрою $-\pi/2$, питомої потужності вібраційного поля a_z та ω_z , технологічних параметрів сушки (зокрема часу сушки t , продуктивності повітряного насоса Q_t задана та виділеної потужності тепла P_t задана на електротені для заданої маси завантаження сипучим матеріалом корпусу 3 U – подібної форми) в блок технологічно оптимальних параметрів 22 потрапляють із блока введення даних 23. В результаті постійного в часі порівняння на виході компаратора 21 отримується параметр $\pm \Delta a$ котрий чітко та однозначно дозволяє зробити висновок на скільки і в котру сторону необхідно провести корекцію амплітуди коливань корпусу 3 U – подібної форми для того щоб забезпечити стабільне в часі значення питомої потужності вібраційного поля в секціях 4 та 5 корпусу 3 U – подібної форми. На основі $\pm \Delta a$ блок регуляторів 18 проводить корекцію амплітуди циклічної вимушуючої сили F_p керованого віброприводу та забезпечує стабільне значення питомої потужності вібраційного поля корпусу 3 U – подібної форми, що в свою чергу забезпечує задану якість перемішування сипучого матеріалу.

Зміна власної резонансної частоти ω_0 свідчить про зміну маси завантаження сипучим матеріалом в секціях 4 та 5 корпусу 3 U – подібної форми вона може бути зовнішньо обумовлена (іншими технологічними пристроями чи процесами), зокрема зміною продуктивності адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі, або зміною фізичних параметрів сипучого матеріалу (зокрема густини). Якість технологічного процесу сушки із температурним градієнтом та технологічного процесу конвективної сушки пов'язана [7, 8] певними оптимальними співвідношеннями між часом сушки, масою сипучого матеріалу, температурним та конвективним градієнтом. Тому в конструктивне рішення запропонованого адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі включено корекцію температурного та конвективного градієнта в

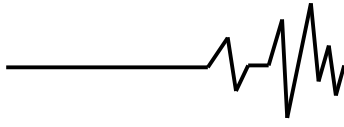
залежності від маси сипучого матеріалу, що перебуває секціях 4 та 5 корпусу 3 U – подібної форми. Інформація про масу завантаження сипучим матеріалом (про її зміну) передається через власну резонансну частоту ω_0 корпусу 3 U – подібної форми давачем вібрації 24 в блок оптимальних параметрів 22. В блоці оптимальних параметрів 22 виходячи із заданих оптимальної продуктивності повітряного насоса Q_t задана та оптимальної виділеної потужності тепла P_t задана на електротені для заданої маси завантаження сипучим матеріалом корпусу 3 U – подібної форми (тобто для певного заданого ω_0 задана) проводить визначення необхідної продуктивності повітряного насоса Q_t та оптимальної виділеної потужності тепла P_t на електротені для дійсної маси завантаження сипучим матеріалом (тобто для реальної ω_0) секцій 4 та 5. При лінійних залежностях між масою сипучого матеріалу, температурою, кількістю повітря та часом сушки можна стверджувати про те, що при ω_0 задана $\rightarrow Q_t$ задана, а при $\omega_0 \rightarrow Q_t$ то із даного припущення легко обчислити необхідну поправку для Q_t . В даному випадку

$$\pm \Delta Q_t = Q_t \text{ задана} - \left[\omega_0 / \omega_0 \text{ задана} \right] \cdot Q_t \text{ задана}$$

для визначення поправки на корекцію виділеної потужності тепла електротеном P_t можна обчислити із тих же самих міркувань

$$\pm \Delta P_t = P_t \text{ задана} - \left[\omega_0 / \omega_0 \text{ задана} \right] \cdot P_t \text{ задана} \cdot U$$

випадку нелінійних залежностей між масою сипучого матеріалу, температурою, кількістю повітря та часом сушки поправку можна обчислити виходячи із даних залежностей, але запропоноване конструктивне рішення адаптивного пристрою для сушки матеріалу у віброкип'ячому шарі реалізувати можливість корекції температурного та конвективного градієнта по любому закону. Тому, на основі $\pm \Delta Q_t$ та $\pm \Delta P_t$ блок регуляторів проводить безпосередній вплив на колкість виділяемого тепла (12) та на продуктивність повітряного насоса 16 забезпечуючи оптимальні параметри для сушки сипучого матеріалу в секціях 4 та 5 корпусу 3 U – подібної форми.

**Література**

1. Авт. св. № 252191 (СССР), М. Кл. F 26В. Устройство для сушки материала в кипящем слое. Э.Н. Гулида, О.П. Калиновская, А.И. Чернявский, В.Д. Кармазин (СССР). - №1248885/21-6; Оpubл. 20.07.1968; Бюл. № 9, 2 с.
2. Авт. св. № 388180 (СССР), М. Кл. F 26В. Устройство для сушки материала в кипящем слое. О.П. Калиновская, А.И. Чернявский, В.И. Лабай, М.Н. Осередчук, И.Ш. Тютяев, В.Я. Лысенко, А.В. Филатов. (СССР). - №1671772/24-6; Оpubл. 22.06.1973; Бюл. № 28, 2 с.
3. Авт. св. № 406711 (СССР), М. Кл. В 24В 31/06. Установка для вибрационной обработки деталей. В.А. Повидайло, П.Д. Денисов, В.А. Щигель (СССР). - №1663153/25-8; Оpubл. 21.11.1973; Бюл. № 46, 2 с.
4. Авт. св. № 795905 (СССР), М. Кл. В 24В 31/06. Установка для вибрационной обработки деталей. П.Д. Денисов, В.И. Кармалюк, Н.Ф. Брайлян (СССР). - №2693889/25-8; Оpubл. 15.06.1982; Бюл. № 22, 3 с.
5. Авт. св. № 935256 (СССР), М. Кл. В 24В 31/06. Вибрационная установка. П.Д. Денисов, В.И. Кармалюк, Н.Ф. Брайлян (СССР). - №2693889/25-8; Оpubл. 15.01.1981; Бюл. № 2, 2 с.
6. Анисимов А.В., Тимофеев В.С. Расчет и оптимизация химических реакторов. Часть 1. Идентификация структуры потоков в химических реакторах методом исследования функций откликов. Конспект лекций. - Москва, МИТХТ, Росвузнаука, 1992. - 40 с.
7. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. - 432 с.
8. Горбатюк В.И. Процессы и аппараты пищевых производств. - М.: Колос, 1999. - 335 с.
9. Хайкии С. Э. Физические основы механики. - М.: Наука, 1971. - 751 с.
10. Пат. 87776 А Україна, В65G27/00. Спосіб керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин. Серета Л.П., Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. (Україна). - № а200803685; Оpubл. 10.08.2009; Бюл. № 15, 4 с.
11. Пат. 92041 А Україна, В65G27/100. Спосіб стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин. Серета Л.П., Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. (Україна). - № а200806209; Оpubл. 27.09.2010; Бюл. № 18, 3 с.
12. Шмигальський В.Н. Критерий равноценности вибраций различных частот // Труды НИИЖБ. Гостстройиздат. - М.: 1959. - № 11. - С. 35-41.
13. Сердюк Л.И., Давыденко Ю.А., Осина Л.М. Различные подходы к оценке динамических, энергетических и технологических возможностей вибрационных машин // Вибрации в технике и технологиях. Всеукраїнський науково-технічний журнал. 2004. - № 3 (35) - С.113-117.