

**Стаднік М.І.**

д.т.н., професор

**Ярошенко Л.В.**

к.т.н., доцент

**Омельянов О.М.**

старший викладач

**Вінницький  
національний аграрний  
університет****Stadnik M.****Yaroshenko L.****Omelyanov O.****Vinnitsia National  
Agrarian University****УДК 62-521:62-868:62-531.7****ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ  
ПРИВОДУ ЛОТКОВОЇ  
ВІБРОСУШАКИ ДЛЯ СУШІННЯ  
СИПУЧОЇ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ  
ПРОДУКЦІЇ**

Запропоновано конструкцію вібраційної сушарки принцип роботи якої ґрунтується на переміжному нагріванні зернової продукції, що вібротранспортується моношаром і прогрівається інфрачервоним промінням, при чому періоди нагрівання чергуються із періодами продування холодним повітрям. Для збудження коливань кожного з вібротоків використані по два електромагнітні збудники, які мають порівняно нижчу металоємність та легше піддаються регулюванню під час роботи. Використання двох синхронізованих електромагнітних віброзбудників коливань дозволило розосередити вимушуючу силу прикладати її одразу у двох місцях вібротоків, що особливо важливо з огляду на значну протяжність вібротоків. У ході теоретичних досліджень проаналізовано та уточнено конструктивну схеми вібраційного лотка із електромагнітним приводом і уточнено його динамічну модель, яка дозволила отримати диференційні рівняння його руху як електромеханічної системи. Отримані результати дозволяють встановити аналітичну залежність між струмом, який протікає в котушці електромагніту віброприводу та параметрами напруги її живлення, що дозволяє ґрунтовніше досліджувати хід електромеханічних процесів у електромагнітному приводі вібротоків вібросушарки та уточнити методики інженерного розрахунку цих приводів.

**Ключові слова:** електромагнітний вібропривод, лоткова вібросушарка, вібротранспортування.

**Постановка проблеми.** Сушіння чи видалення рідини із твердих, газоподібних чи рідких продуктів або матеріалів дуже широко використовується у сільськогосподарському виробництві та практично в усіх галузях промислового виробництва. У процесі сушіння оброблювані вологі матеріали не тільки позбавляються вологи, але можуть набувати нових якостей, у них відбуваються структурні зміни, а також зміни механічних і біохімічних властивостей.

Оскільки процес сушіння є досить енергозатратним [1], то удосконалення нових енергоощадних машин для теплової обробки сипучої зернової сільськогосподарської продукції є важливою народногосподарською задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У Вінницькому національному аграрному університеті розроблено спосіб енергоощадного сушіння сипучої зернової продукції [2] при її вібротранспортуванні моношаром із неперервним підкиданням по вібротоків та одночасному опроміненні інфрачервоним промінням. Для реалізації даного способу сушіння сипучої зернової продукції була розроблена конструкція вібраційної сушарки з електромеханічним дебалансним віброприводом коливань робочого органу та інфрачервоними випромінювачами [3], яка містить раму, пружні елементи, горизонтальний робочий лоток з плоским днищем і два дебалансні віброзбудники, що обертаються назустріч один



одному і розміщуються симетрично відносно вертикальної площини, яка проходить через повздовжню вісь робочого лотка, а їхні подовжні осі розташовані під кутом до поздовжньої осі робочого лотка, касети з інфрачервоними випромінювачами, патрубкі подачі і вивантаження сипучого матеріалу, патрубкі подачі і відведення повітря. При роботі вібросушарки, точки робочої поверхні вібрлотка здійснюють коливання під кутом до горизонтальної площини за рахунок чого виникає асиметрія сил тертя гранул оброблюваної сипучої продукції об робочу поверхню вібрлотка і продукція починає переміщатись вздовж вібрлотка піддаючись дії інфрачервоного проміння від випромінювачів. При роботі вібраційної сушарки періоди нагрівання зерна інфрачервоним промінням чергуються із періодами обдування холодним повітрям. Використання даної вібросушарки на операції сушіння гречаної крупи дозволило зменшити питомі енерговитрати приблизно у 1,5-2 рази порівняно з широко розповсюдженими конвективними шахтними сушарками. Таке значне зменшення питомих енергозатрат пов'язане з усуненням втрат енергії з відпрацьованим нагрітим вологим повітрям, яке викидалось в атмосферу.

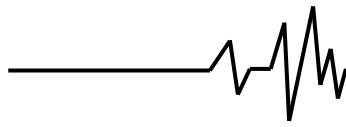
Однак, дана вібросушарка має певні конструктивні недоліки, які пов'язані із використанням електромеханічного віброприводу коливань її робочого органу. Даний вібропривод містить два дебалансні вібробудувачі з окремими електродвигунами, що обертаються назустріч один одному, а для синфазності їх обертання використовується явище динамічної синхронізації [4]. Така конструкція віброприводу, дозволяє під час обертання електродвигунів генерувати пульсуючу вимушуючу силу, яка направлена під кутом до робочої поверхні вібрлотка і прикладається до нього практично в одному місці. Але, виходячи із технології сушіння, робочий орган вібросушарки – вібрлоток повинен мати значну довжину (не менше 3...4 метрів). Тому, окрім робочих, тих, що задаються вібробудувачем коливань, вібрлотки піддаються також паразитним коливанням, що пов'язані з пружними деформаціями вібрлотка. Амплітуди таких коливань можуть в декілька разів перевищувати робочі, що призводить до порушень технологічних процесів, зокрема нерівномірності опромінення гранул сипучої продукції по довжині і по поперечному перерізі вібрлотка, а також до виникнення небезпечних напруг у тілі вібрлотка, які можуть викликати його руйнування. Для зменшення величини пружних деформацій вібрлотків підвищують їхню жорсткість, збільшуючи поперечний

переріз певних деталей вібрлотків, але це призводить до зростання загальної маси вібрлотків, які коливаються, а отже до зростання необхідної величини вимушуючої сили вібробудувачів, що може призвести до перевищення допустимих навантажень на підшипникові вузли вібробудувачів.

Застосування декількох відносно малопотужних вібробудувачів замість одного потужнішого дозволяє розосередити вимушуючу силу по вібруючому лотку, що особливо важливо при створенні протяжних вібрлотків. При застосуванні декількох електромеханічних дебалансних вібробудувачів, що розосереджені по довжині вібрлотка ускладнюється синхронізація обертання їхніх приводних електродвигунів, конструктивно забезпечити яку досить складно, а іноді і не можливо [4].

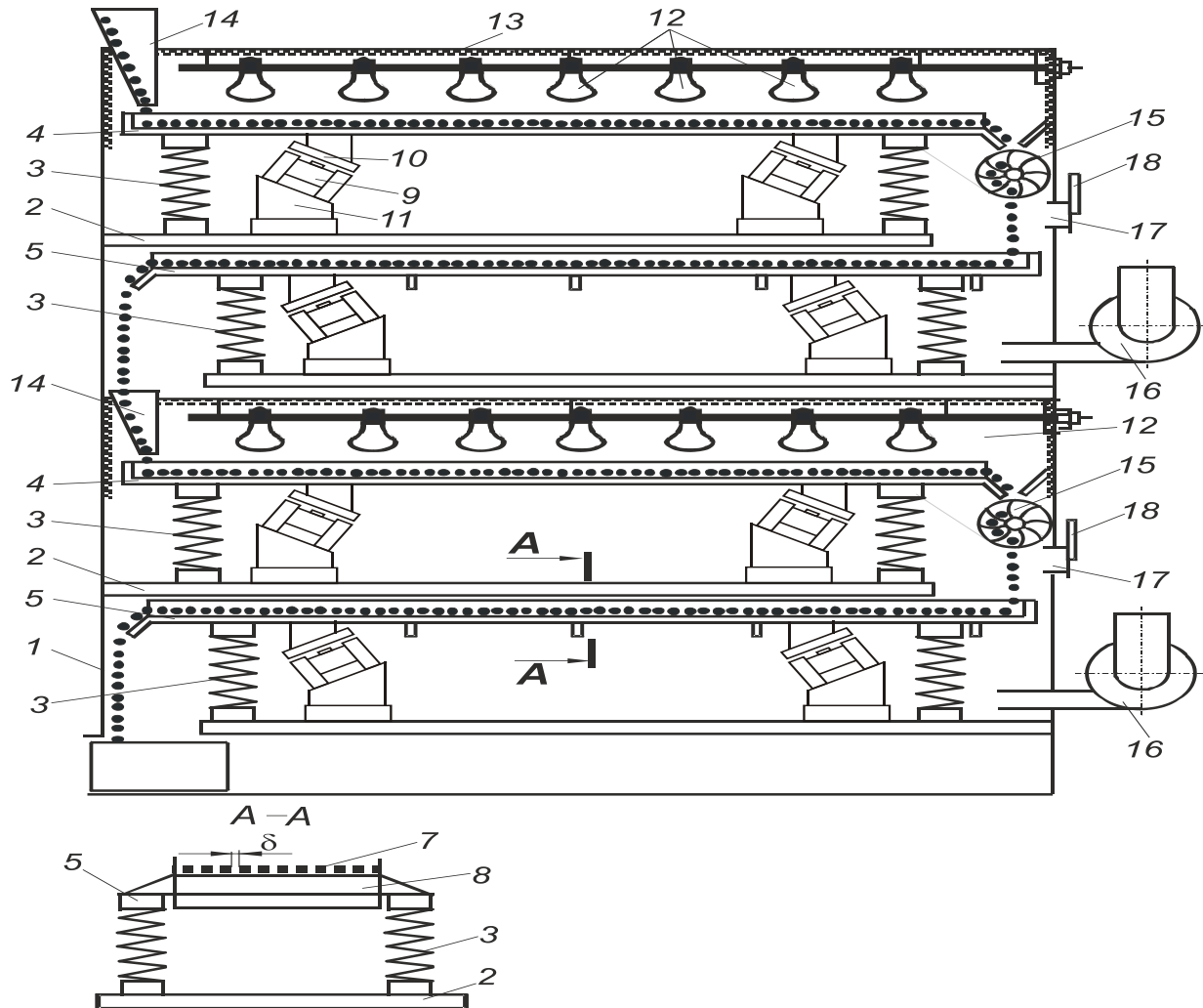
**Постановка завдання.** Розробити конструктивну схему вібраційної лоткової сушарки та динамічну модель керованого вібропривода напрямленої дії з двома електромагнітними збудниками лінійних коливань вібрлотків і дослідити вплив параметрів електромагнітних віброприводів на роботу вібросушарок.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для реалізації вказаної мети авторами розроблена конструкція вібраційної лоткової сушарки з електромагнітним приводом коливань вібрлотків та переміжним нагріванням зернової продукції інфрачервоним промінням. Принципова схема вібросушарки приведена на рис. 1. Вібросушарка складається із закритого кожухом корпусу (1), на площадках (2) якого за допомогою пружних елементів (3) встановлено два (або більше) термічних (4) і два (або більше) колосникових (5) лотки. Лотки встановлені один під одним, таким чином, щоб термічні лотки (4) чергувались із колосниковими лотками (5), причому верхнім (першим) лотком є термічний, а нижнім – колосниковий. Робочі доріжки термічних лотків (4) виготовляються із жаростійкої листової сталі. Робочі доріжки колосникових лотків утворюються повздовжніми вертикальними смужками (7), що приварені до кронштейнів (8), таким чином, щоб між ними був повздовжній зазор  $\delta = 2,5 \dots 3$  мм. На певній відстані від початку та в кінці кожного лотка змонтовано віброприводи, що містять котушку електромагніту (9), яка за допомогою кронштейна (11) встановлена на площадці (2), якір електромагніту (10) кріпиться до лотків (4) чи (5). Причому у кожному віброприводі електромагніти (9) та якорі (10) встановлені під кутом  $\beta$  до площин робочих доріжок лотків. Над поверхнями термічних лотків (4) закріплені термогенератори (12) (лампи ІЧ3). Зверху і з боків термічні лотки (4) закриті



термоізоляцією (13). Над початками термічних лотків (4) закріплені завантажувальні горловини (14), а в кінці барабанні крильчатки (15). Нижче поверхонь колосникових лотків (5) розміщені нагнітальні патрубки вентиляторів (16), а вище

поверхні колосникових лотків (6) – вивідні патрубки (17) з регульовальними шиберами (18). В кінці нижнього колосникового лотка (5) встановлено ємність для готової продукції (19).



**Рис. 1. Принципова схема вібраційної моношарної сушарки з переміжним нагріванням та електромагнітним віброприводом**

1 - корпус; 2 - площадки; 3 - пружини; 4 – лоток суцільний; 5 – колосниковий лоток; 6- завантажувальний бункер; 7 - смужка; 8 - стяжка; 9- котушка електромагніта; 10 – ярі; 11 – кронштейн; 12 – лампа ІЧЗ; 13 – термо-ізоляція; 14-завантажувальні горловини; 15 – крильчатка барабанна; 16 – електровентилятор; 17 - патрубок; 18 – шибер; 19 - ємність для продукції

Вібросушарка працює таким чином. При подачі змінного струму на котушки електромагнітів (9) навколо них утворюється магнітне поле, яке притягуватиме ярі (10), при цьому стискатимуться пружини (3), але оскільки струм, що протікає по котушці (9) є змінним то навколо котушки утворюватиметься пульсуюче магнітне поле внаслідок чого генеруються поступальні коливання лотків (4) і (5) під кутом  $\beta$  до площин їх робочих доріжок. Сипуча продукція подається через завантажувальну горловину на поверхню лотків, де під дією коливань розподіляється моношаром. Під дією коливань лотків між їх поверхнею і частинками

сипучої продукції виникає асиметрія сил тертя, що призводить до виникнення направлено руху частинок сипучої продукції (вібротранспортування) вздовж поверхні лотків. При цьому точки поверхні лотків коливаються відносно деякого центру без направлено руху вцілому за період одного коливання. Встановлюється режим вібротранспортування із неперервним підкиданням частинок сипучої продукції під час їх переміщення вздовж лотків. Неперервне підкидання частинок продукції призводить до їх хаотичного провертання при переміщенні вздовж термічних лотків (4), над якими знаходяться термогенератори (12) і



сприяє їх рівномірному опроміненню з усіх боків інфрачервоним промінням, що призводить до інтенсивного, швидкого і рівномірного прогрівання гранул сипучої продукції.

Після проходження термічних лотків, прогріта сипуча продукція подається через барабанні крильчатки (15) на колосникові лотки (5), де обдувається атмосферним повітрям від вентиляторів (16). При цьому неперервне хаотичне підкидання і провертання частинок продукції також покращує рівномірність їх обдування повітрям, що призводить до порушення рівноважного стану вологи у частинках продукції, коли тиск парів води в них стає більшим за парціальний тиск парів води у повітрі, внаслідок чого волога починає інтенсивно випаровуватись.

Сипуча продукція по чергово проходить через декілька термічних лотків (4) і відповідно через декілька колосникових лотків (5), що призводить до періодичного нагрівання і охолодження її частинок, а, отже, до створення оптимальних умов випаровування вологи, при невисокій максимальній температурі нагрівання частинок продукції. Оброблена продукція після проходження нижнього колосникового лотка (5) подається у ємність для готової продукції (19). Барабанні крильчатки (15) запобігають доступу потоку холодного повітря від вентиляторів (16) у камери високої температури над термічними лотками (4) і водночас дозволяють пересипання продукції з термічних лотків (4) на колосникові 5. Інтенсивність повітряних потоків регулюється шиберами (18). Швидкість вібротранспортування сипучої продукції, а отже час її знаходження на поверхні лотків, регулюється шляхом зміни напруги чи частоти струму живлення електромагнітів (9), або кута  $\beta$ . Оскільки інфрачервоне випромінювання термогенератора (12) дозволяє створити дуже інтенсивний тепловий потік, що сприяє швидкому прогріванню частинок продукції, а процес випаровування із них вологи вимагає більшого проміжку часу, то швидкість вібротранспортування на колосникових лотках (5) встановлюється меншою, а самі вони виготовляються із ширшими робочими доріжками.

Дана вібросушарка зберігає усі переваги вібраційної сушильної машини, що описана вище, при цьому максимальна температура прогрівання частинок продукції у 1,5 – 2 рази менша при більших можливих межах зменшення їх вологості. Це дозволяє здійснювати більш якісний обробіток продукції при менших теплових витратах. Однак, оскільки вихідна вологість сипучої продукції може коливатись у дуже широких межах, то для регулювання швидкості вібротранспортування сипучої продукції вздовж вібрлотків, а отже

часу їх обробки на кожному лотку, для живлення електромагнітів віброзбуджувачів використаний широко імпульсний регулятор частоти змінного струму, який дозволяє регулювати частоту коливань вібрлотків та величину вимушувальної сили віброзбуджувача.

Зерно у сушарці вібротранспортується моношаром і прогривається інфрачервоним промінням від ламп ІЧЗ (інфрачервона дзеркальна), випромінювання яких діє переважно на вологе зерно, причому періоди нагрівання чергуються із періодами продування холодним повітрям, а для збудження коливань вібрлотків використані електромагнітні збудники коливань у яких відсутні підшипникові вузли, вони мають порівняно нижчу металоемність та легше піддаються регулюванням під час роботи.

Для приведення у коливний рух кожного з вібрлотків сушарки використано по два однакових електромагнітних збудники коливань, робота яких синхронізується шляхом живлення від одного джерела змінного струму.

При теоретичних дослідженнях [5-7] вібраційні лотки з електромагнітним віброзбудником коливань доцільно розглядати як єдину електромеханічну систему. Оскільки при коливаннях змінюється повітряний зазор між магнітопроводом котушки і якорем електромагнітного віброзбудника, а це призводить до зміни індуктивності котушки, а отже і величини зусилля, яке розвиває електромагнітний віброзбудник, та одночасно дією цього зусилля на механічну коливну систему. Виходячи з цього, при математичному моделюванні електромагнітного приводу обов'язково враховують вплив механічної коливної системи на електромагнітні процеси у віброзбудників.

Перетворювачем електромагнітної енергії в механічну і джерелом механічної енергії вимушених коливань лотка є електромагнітний віброзбудник.

Особливістю математичного моделювання електромеханічних віброзбудників є наявність як механічних елементів (пружні елементи та маси), так і електричних кіл (котушок збудження і підмагнічування). Тому найбільш прийнятними для опису електромеханічних систем слід вважати рівняння Лагранжа - Максвелла, оскільки їх побудова призводить до систем спільних рівнянь, що описують динаміку як механічної так і електричної частин електромеханічного віброзбудника.

При розгляді електромагнітних процесів, що відбуваються у рамках електродинаміки, вводять такі припущення[5]:

- при описі електромагнітних процесів,



нехтують впливом поширення електромагнітних хвиль, отже, розглядають їх в квазістаціонарному наближенні;

- провідники у системі є лінійними і їхні поперечні розміри значно менші поздовжніх;

- залежністю індукції від розподілу струму поперечного перерізу провідника нехтують;

- простір, що оточує провідники, заповнений магнітолінійним середовищем, в якому магнітна індукція - лінійна функція струмів;

- електричною енергією контурів порівняно з магнітною нехтують.

Принципова схема [6] коливної електромеханічної системи вібрлотка з реактивною масою зображено на рис. 2. До складу коливної електромеханічної системи вібрлотка входить робочий орган - вібрлоток (1), (що являє собою активну масу  $m_A$ ), який за допомогою пружної підвіски (2) встановлюється на основі (рамі) (3), що є у даному випадку реактивною масою  $m_r$ . Для віброізоляції основа (3) монтується на віброопорах (4). На

основі (3) жорстко закріплюється магнітопровід (5) з котушкою електромагніта (6). Якір електромагніта (7) також жорстко кріпиться до робочого органу вібрлотка - вібрлотка (1). Пружна підвіска (2) вібрлотка має певні параметри, які можна охарактеризувати такими показниками, як коефіцієнт опору  $b = -f/x$  (де  $f$  - коефіцієнт тертя, опору повітря) та жорсткість пружної підвіски вібрлотка  $k$ .

При подачі напруги живлення  $U(t)$  на котушку електромагніта, через неї протікатиме сила струму  $I(t)$  і навколо котушки утвориться магнітне поле, яке діятиме на якір (7) з силою  $F(I, x, t)$ . Під дією цієї сили, якір (7) а з ним і вібрлоток з активною масою  $m_A$  здійснюватиме переміщення  $x_a(t)$  (повітряний зазор почне змінюватись). Водночас, така ж сила  $F(I, x, t)$ , діятиме і на магнітопровід (5) з котушкою (6), а через них на раму (3) з реактивною масою  $m_r$ , яка також почне здійснювати переміщення  $x_r(t)$ .

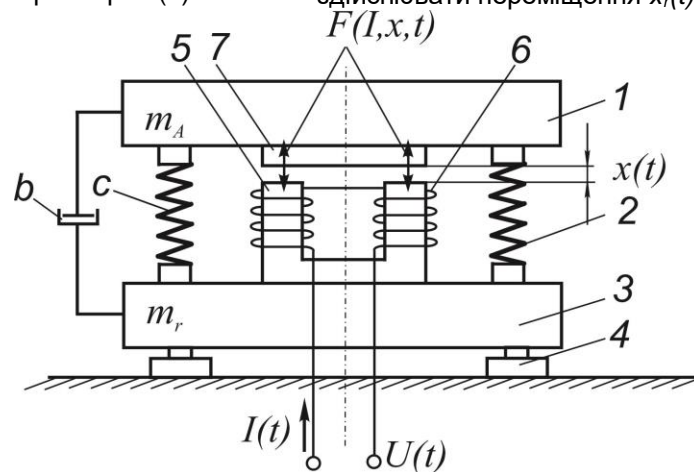


Рис. 2. Принципова схема коливної електромеханічної системи вібрлотка з реактивною масою

1 - вібрлоток (активна маса  $m_A$ ); 2 - пружна підвіска лотка; 3 - основа (реактивна маса  $m_r$ ); 4 - віброопора; 5 - магнітопровід; 6 - котушка; 7 - якір;  $x(t)$  - повітряний зазор (переміщення якоря);

$F(I, x, t)$  - вимушуюча сила електромагнітного віброприводу;  $U(t)$  - напруга живлення електромагніта;  $I(t)$  - сила струму, що протікає по обмотці електромагнітного віброприводу;

$b$  - коефіцієнт опору  $b = -f/x$  ( $f$  - коефіцієнт тертя, опору повітря),  $k$  - жорсткість пружної підвіски вібрлотка

При подачі змінної напруги на котушку електромагніту (6), якір (7) буде притягтися до магнітопроводу (5) з пульсуючою силою  $F(I, x, t)$ , яка періодично зникатиме, і у ті моменти коли вона буде рівною нулю вібрлоток (1) під дією пружних сил підвіски (2) періодично повертатиметься у вихідний стан, а отже здійснюватиме періодичні коливання. Частота пульсацій сили буде вдвічі вищою від частоти змінного струму, а отже і частота коливань вібрлотка (1) також буде вдвічі

більшою. Для зменшення частоти коливань вібрлотка (1) на його котушку часто подають постійний пульсуючий струм, який отримують пропускаючи змінний струм через випрямний діод або від спеціального генератора імпульсів постійного струму.

Враховуючи вище приведені припущення, можна скласти систему вихідних диференціальних рівнянь [6], які описують роботу коливної електромеханічної системи, що має дві маси які коливаються:



$$\begin{cases} m_a \frac{d^2 x_a}{dt^2} + b \cdot \left( \frac{dx_a}{dt} - \frac{dx_r}{dt} \right) + c \cdot (x_a - x_r) = F(I, (x_a - x_r), t) \\ m_r \frac{d^2 x_r}{dt^2} - b \cdot \left( \frac{dx_a}{dt} - \frac{dx_r}{dt} \right) - c \cdot (x_a - x_r) = -F(I, (x_a - x_r), t) \\ \frac{d}{dt} (L(x, I) \cdot I(t)) + R \cdot I(t) = U(t), \end{cases} \quad (1)$$

де  $x_a$  та  $x_r$  – координати положення активної та реактивної маси;  $m_a$  – величина активної маси (вібрлотка);  $m_r$  – величина реактивної маси (основи або рами);  $F(I, (x_a - x_r), t)$  – величина вимушуючої сили, яку створює електромагніт віброприводу;  $b$  – коефіцієнт не пружного опору підвіски вібрлотка, що рівний:  $b = -\mu/x$  де  $\mu$  – коефіцієнт тертя, опору повітря);  $c$  – коефіцієнт жорсткості пружної підвіски;  $I(t)$  – сила струму в обмотці електромагніта;  $L(x, I)$  – індуктивність електромагніта віброзбудника;  $R$  – величина активного опору котушки електромагніта віброзбудника.

Припустивши, що коливання вібрлотка (1) є лінійними і описуються відносною координатою  $x$  ( $x = x_a - x_r$ ), та використовуючи приведену масу коливних частин даної електромеханічної системи  $M$  буде мати такий вигляд:

$$M = m_a \cdot m_r / m_a + m_r \quad (2)$$

Систему диференціальних рівнянь, що описують коливання у електромеханічній системі вібропривода можна спростити:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = F(I, x, t) \\ \frac{d}{dt} (L(x, I) \cdot I(t)) + R \cdot I(t) = U(t) \end{cases} \quad (3)$$

У даній системі диференціальне рівняння, що записане зверху описує механічний рух вібрлотка, пов'язуючи рух робочого органу (координата  $x$ ) з пружними і дисипативними силами коливної системи та вимушуючою електромагнітною силою віброприводу  $F(I, x, t)$  що залежить від переміщення якоря з робочим органом  $x(t)$ , оскільки при зміні зазору між якорем та магнітопроводом котушки віброприводу змінюється і сила їх притягання  $F$ .

Диференціальне рівняння, що записане знизу у системи (3) складене на основі рівноваги напруг [6] і описує хід електромагнітних процесів у віброприводі, воно також враховує падіння напруги на активному опорі котушки електромагніту та

е.р.с. (електрорушійна сила) самоіндукції, що індукується при зміні величини індуктивності  $L(x, I)$  котушки електромагніту, оскільки вона також залежить від величини зазору (переміщення  $x(t)$ ). Отже це рівняння вказує на зв'язок між механічним переміщенням вібрлотка  $x(t)$ , силою струму у котушці  $I(t)$  та напругою живлення котушки  $U(t)$ .

Сила струму  $I(t)$  в котушці електромагніту віброприводу в основному визначає вимушуючу силу  $F(I, x, t)$  яка виникає між якорем і магнітопроводом в електромагнітному віброприводі. Для розрахунку параметрів котушки електромагнітного віброприводу з метою забезпечення необхідної вимушуючої сили  $F(I, x, t)$  необхідно встановити аналітичний зв'язок між струмом в котушці  $I(t)$  і законом руху вібрлотка  $x(t)$  для отримання заданих параметрів його коливань.

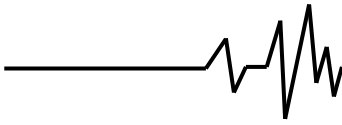
Щоб встановити цей зв'язок необхідно розглянути нижнє рівняння у системі (3), здійснивши його диференціювання [6] отримаємо:

$$L(x, I) \frac{dI}{dt} + I \frac{dL(x, I)}{dt} + R \cdot I(t) = U(t) \quad (4)$$

У загальному випадку, індуктивність електромагніту  $L$  залежить від двох змінних [6]: сили струму  $I(t)$ , який протікає по котушці за умови насичення магнітопроводу і величини зазору  $X_0$  між магнітопроводом і якорем. При дослідженні зміни індуктивності котушки віброприводу необхідно врахувати те, що виходячи з принципу роботи віброприводу: початковий зазор між ярмом та якорем електромагніту віброприводу не може дорівнювати нулю ( $X_0 \neq 0$ ) і завжди більший від амплітуди коливань вібрлотка ( $X_0 > |x(t)|$ ).

Необхідно врахувати також те, що максимальні робочі значення струму є обмеженими і тому під час роботи магнітопровід електромагнітного віброприводу не насичений [6]. Зважаючи на особливості конструкції електромагніту даного віброприводу можна відмітити, що його індуктивність в основному залежатиме від зазору  $X_0$ , а струм в котушці  $I(t)$  створюватиме набагато менший вплив.

Згідно з [6], величина початкового зазору  $X_0$  визначається законом руху робочого органу



$x(t)$ . Тому зміну індуктивності котушки віброприводу можна описати такою залежністю:

$$L(x) = L_0 \cdot \left(1 + \frac{x(t)}{X_0}\right)^{-1}, \quad (5)$$

де  $L_0$  - індуктивність котушки при початковому заторі  $X_0$ .

Враховуючи конструктивні параметри електромагніту і його котушки індуктивність останньої [6] залежно від величини заторувизначається виразом:

$$U_0 \cos \omega t = R \cdot i(t) \cdot X_0^2 + 2 \cdot R \cdot i(t) \cdot X_0 \cdot x(t) + R \cdot i(t) \cdot x(t)^2 + \frac{1}{(X_0 + x(t))^2} \left( \mu \cdot S \cdot \varpi^2 \cdot \left(\frac{d}{dt} i(t)\right) \cdot X_0 + \mu \cdot S \cdot \varpi^2 \left(\frac{d}{dt} i(t)\right) \cdot x(t) - i(t) \cdot \mu \cdot S \cdot \varpi^2 \cdot \left(\frac{d}{dt} i(t)\right) \right). \quad (7)$$

Щоб розв'язати дане рівняння необхідно вивести залежність, що описує рух вібротка як робочого органу. Зважаючи на те, що у даному випадку робочий орган здійснює рух, що описується гармонійними коливаннями [6] матимемо:

$$x(t) = X_A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (8)$$

де  $\omega$  - частота коливань робочого органу;  $\varphi$  - кут зсуву фаз між коливаннями вимушуючої сили і переміщеннями робочого органу;  $X_A$  - амплітуда коливань вібротка, що залежить від коефіцієнта динамічності [7] («відлаштування коливної системи від резонансу») та її дисипативних властивостей.

У випадку резонансного режиму роботи вимушені коливання робочого органу  $x(t)$  завжди відставатимуть від коливань сили віброприводу на чверть періоду [7]. Оскільки, вимушуюча сила, що генерується електромагнітним віброприводом збігається по фазі зі струмом  $I(t)$  у його котушці, то у цьому випадку зсув фаз коливань між переміщенням  $x(t)$  та струмом у котушці  $I(t)$  буде рівний чверті періоду коливань  $\varphi = -2\pi/4 = -\pi/2$ .

У випадку живлення електромагнітного віброприводу від мережі із частотою  $f = 50$  Гц, частота коливань робочого органу буде удвічі більшою. Отже, при використанні синусоїдальної напруги в якості джерела живлення електромагнітного віброприводу його слід розглядати як котушку із індуктивністю  $L_0$ , а в колі змінного синусоїдального струму з індуктивним навантаженням існує зсув фаз між напругою та струмом і напруга відстає на  $\pi/2$  від струму. Враховуючи даний фактор можна легко знайти миттєву потужність електромагнітного віброприводу  $P(t) = U(t) \cdot I(t)$ .

**Висновки.** Запропоновано конструкцію сушарки, принцип роботи якої ґрунтується на переміжному нагріванні зернової продукції, що вібротранспортується моношаром і

$$L_0 = \frac{\mu_0 \cdot S \cdot \varpi^2}{X_0}, \quad (6)$$

де  $\mu_0$  - магнітна постійна;  $S$  - площа поперечного перетину осереддя котушки;  $\varpi$  - кількість витків у котушці.

Підставивши ці вирази у вихідне диференціальне рівняння (4) визначимо взаємозв'язок між електромагнітними процесами в електромагнітному віброприводі та законом руху [6] вібротка  $x(t)$ :

прогрівається інфрачервоним промінням від ламп ІЧЗ, при чому періоди нагрівання чергуються із періодами продування холодним повітрям. Для збудження коливань кожного з вібротків використані по два електромагнітні збудники у яких відсутні підшипникові вузли і вони мають порівняно нижчу металоемність та легше піддаються регулюванню під час роботи. Використання двох синхронізованих електромагнітних віброзбудників коливань дозволило розосередити вимушуючу силу та прикладати її одразу у двох місцях вібротка, що особливо важливо з огляду на значну протяжність вібротків вібросушарки.

У ході теоретичних досліджень проаналізовано та уточнено конструктивну схему вібраційного лотка із електромагнітним приводом, і уточнено його динамічну модель, яка дозволила отримати диференціальні рівняння його руху як електромеханічної системи. Отримані результати дозволяють встановити аналітичну залежність між струмом  $I(t)$ , який протікає в котушці електромагніту віброприводу та параметрами напруги її живлення, що дозволяє ґрунтовніше досліджувати хід електромеханічних процесів у електромагнітному приводі вібротків вібросушарки та уточнити методики інженерного розрахунку цих приводів.

#### Список використаних джерел

1. Рогов, И. А. Физические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов, А.В. Горбатов. - М.: Изд-во «Пищевая промышленность», 1974. - 583 с.
2. Пат. № 45431 Україна, F26B5/00 Спосіб вібромоношарного сушіння. Ярошенко Л.В. Опубл. 15.04.2002 Бюл. № 4, 3 с.
3. Ярошенко Л.В. Вібраційна моношарна сушильна машина переміжного нагрівання Вибрации в технике и технологиях. - 2000. -



№ 1. – С. 74 - 76.

4. Оpirский Б.Я. Новые вибрационные станки: конструирование и расчёт/ Оpirский Б.Я., Денисов П.Д. – Львов: Світ, 1991. – 160с.

5. Божко А.Е. Методы проектирования электромеханических вибровозбудителей/ А.Е. Божко, В.И. Пермяков, В.А. Пушня – К.: Наук. Думка, 1989. – 208 с.

6. Чубик Р.В. Керовані вібраційні технологічні машини/ Р.В. Чубик, Л.В. Ярошенко – Монографія. Вінниця: ВНАУ, 2011. 355 с. ISBN 978-966-2462-35-7;

7. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання. – Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2004. – 248 с.

#### Список джерел в транслітерації

1. Rogovl. A. Phizicheskiye metody obrabotki pichzevyh produktov / I. A. Rogov, A. V. Gorbato. – M.: Izd-vo «Picyzevaya promychlennost», 1974. -583 P.

2. Pat. № 45431Ukrayina, F26B5/00 Sposib vibromonocharnogo suchinnya. Yaroshenko L.V. Opubl. 15.04.2002Byul. № 4, 3 P.

3. YaroshenkoL.V. Vibratziyna monocharna suchylna machyva peremijnogo nagrsvannya/Vibratziy v tehnikе I tehnologiyah.- 2000. – № 1. – P. 74 - 76.

4. OpirskiyB.Y. Novye vibratziionnye stanki: konstruirovaniye I racyet / Opirskiy B.Y., Denisov P.D. – Lvov: Svit, 1991. – 160 P.

5. Bojko A.Y. Metody proektirovaniya elektromehanichzeskih vibrovobuditeley / Bojko A.Y., Permyakov V.I., Puchnya V.A. – K.:Nauk. Dumka, 1989. - 208 P.

6. Chubyk R.V. Kerovani vibratsiyni tekhnolohichni mashyny / R.V. Chubyk, L.V. Yaroshenko. – Vinnytsya.: VNAU, 2011. – 355 P.

7. PovidayloV.O. Vibratziyni pronzesyta obladnannya. – Lviv: Vyd-voNU "Lvivska politehnika", 2004. – 248 P.

#### ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА ЛОТКОВОЙ ВИБРОСУШУШИЛКИ ДЛЯ СУШКИ СЫПУЧЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

**Аннотация:** Предложена конструкция вибрационной сушилки принцип работы, которой основан на перемежающемся нагревании зерновой продукции вибротранспортируемой монослоем и прогреваемой инфракрасными лучами, причем периоды нагрева чередуются с периодами продувки холодным воздухом. Для возбуждения колебаний каждого из вибротростков использованы по два

электромагнитные возбудители которые имеют сравнительно низкую металлоемкость и легче поддаются регулированием во время работы. Использование двух синхронизированных электромагнитных вибровозбудителей колебаний позволило рассредоточить вынуждающую силу и прикладывать ее сразу в двух местах вибротростка, что особенно важно, учитывая значительную его протяженность. В ходе теоретических исследований проанализирована и уточнена конструктивная схема вибрационного лотка с электромагнитным приводом, а также уточнена его динамическая модель, которая позволила получить дифференциальные уравнения его движения, как электромеханической системы. Полученные результаты позволяют установить аналитическую зависимость между током, который протекает в катушке электромагнита вибропривода и параметрами напряжения ее питания, что позволяет исследовать ход электромеханических процессов в электромагнитном приводе вибротростка виброосушарки и уточнить методику инженерного расчета этих приводов.

#### JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF TRAYVIBRATIONAL DRYERACTUATOR FOR DRYING GRAIN AGRICULTURAL PRODUCTS

**Annotation:** The construction of a vibrational dryer is proposed that is based on the intermediate heating of grain products, which are vibrotransported by monolayer and heated by infra-red rays with heating periods alternated with cooling periods. For excitation oscillation of each vibrating tray is used two electromagnetic exciters that have relatively lower metal content and easier to control during operation. The use of two synchronized electromagnetic vibrations of oscillation allowed to disperse the compelling force and to apply it in two places simultaneously of the vibrating tray, which is especially important given its considerable length. In the course of theoretical investigations the constructive schemes of the vibration tray with an electromagnetic actuator have been analyzed and specified, and its dynamic model has been refined, which allowed to obtain differential equations of its motion as an electromechanical system. The obtained results allow to establish the analytical dependence between the current flowing in the coil of the electromagnet of the vibration drive and the parameters of its supply voltage, which allows to thoroughly investigate the course of electromechanical processes in the electromagnet actuator of vibration dryers drives





and to specify the methods of engineering calculation of these actuators.

**Key words:** electromagnetic vibration drive, tray vibrational dryer, vibrotransporting.

#### **Відомості про авторів**

**Стаднік Микола Іванович** – доктор технічних наук, професор кафедри електротехнічних систем технологій та автоматизації в АПК Вінницького національного аграрного університету, Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008

**Ярошенко Леонід Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехнічних систем технологій та автоматизації в АПК Вінницького національного аграрного університету, Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008

**Омельянов Олег Миколайович** – старший викладач кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету, Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008

**Стадник Николай Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры электротехнических систем технологий и автоматизации в АПК Винницкого национального аграрного университета, Служебный адрес: г. Винница, ул. Солнечная 3, ВНАУ 21008

**Ярошенко Леонид Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических систем технологий и автоматизации в АПК Винницкого национального аграрного университета, Служебный адрес: г. Винница, ул. Солнечная 3, ВНАУ 21008

**Омельянов Олег Николаевич** – старший преподаватель кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета, Служебный адрес: г. Винница, ул. Солнечная 3, ВНАУ 21008.

**Stadnik Mykola Ivanovich** – doctor of technical sciences, professor of the department of electrotechnical systems of technologies and automation in agro-industrial complex of Vinnitsa national agrarian university, service address: Vinnytsya st.Sonyachna 3, VNAU 21008

**Yaroshenko Leonid Victorovich** – candidate of technical sciences, associate professor of the department of electrotechnical systems of technologies and automation in agro-industrial complex of Vinnitsa national agrarian university, Service address: Vinnitsa, st.Sonyachna 3, VNAU 21008

**Omelyanov Oleg Mykolayovich** – Senior Lecturer of the Department of General Technical Disciplines and Occupational Safety of Vinnitsa national agrarian university, service address: Vinnytsyast.Sonyachna 3, VNAU 21008