

Скуйбіда Є.Л.

Національний університет харчових технологій

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

Проблема енергоефективності в харчовій промисловості набула особливої актуальності у зв'язку з підвищенням вартості енергоносіїв, посиленням екологічних вимог та необхідністю впровадження сталих виробничих підходів. У дослідженні розглянуто напрямки підвищення енергоефективності технологічного обладнання харчових виробництв шляхом оптимізації перехідних процесів – динамічних режимів, які супроводжують запуск, зупинку або перехід на інші технологічні параметри. Значну частину енергетичних витрат на виробництві формують саме перехідні процеси, які часто ігноруються при плануванні режимів роботи, що призводить до зайвих витрат і зниження ресурсу обладнання. У межах дослідження проаналізовано типові перехідні процеси, що виникають у теплотехнічному та механічному обладнанні різного призначення. Проведено математичне моделювання їх перебігу з урахуванням теплофізичних, кінематичних та інерційних характеристик, які впливають на стабільність і точність керування. Окрему увагу приділено реалізації частотного регулювання обертів електроприводів, застосуванню адаптивних систем керування, модульних рішень для автоматизації та впровадженню систем моніторингу технічного стану агрегатів у реальному часі. На основі отриманих експериментальних і модельних результатів підтверджено ефективність впроваджених рішень: середнє зниження енергоспоживання в перехідних режимах становило 24,7–28,2 %, пікові струмові навантаження зменшено до 53 %, вібраційне навантаження – до 31 %, а температурні перевантаження – на 16–22 %. Оптимізація перехідних процесів сприяла подовженню ресурсу обладнання: електродвигунів – на 19 %, підшипникових вузлів – до 26 %, теплообмінних елементів – на 17 %, що досягнуто без втрат стабільності чи якості виробничого процесу. У підсумку запропоновано практичні рекомендації для впровадження оптимізованих алгоритмів керування у виробничих умовах. Матеріали статті можуть бути використані для модернізації існуючих виробничих ліній, проектування нових енергоощадних технологічних систем і формування політики енергоменеджменту на підприємствах харчової галузі.

Ключові слова: енергоефективність, харчова промисловість, перехідні процеси, частотне регулювання, математичне моделювання, ресурс обладнання, адаптивне керування, рекуперація.

Постановка проблеми. Однією з ключових тем сучасної харчової промисловості є підвищення енергоефективності технологічного обладнання, особливо з урахуванням сучасних викликів енергетичної безпеки та необхідності переходу до сталих моделей виробництва. Підприємства харчової галузі дедалі активніше впроваджують технічні рішення, що дозволяють зменшити споживання енергії, знизити втрати у виробничих процесах та оптимізувати роботу основного й допоміжного обладнання. Все більше виробників розуміють необхідність переходу до енергоощадних технологій, які не лише відповідають міжнародним екологічним стандартам, а й дозволяють зменшити собівартість продукції.

Особливу увагу сучасні інженери та технологи приділяють перехідним процесам, які

супроводжують зміну режимів роботи устаткування – запуск, зупинку, переключення між технологічними етапами. Саме ці динамічні режими найчастіше є джерелом надмірних енергетичних витрат, вібрацій, теплових перевантажень, що негативно впливає як на загальну ефективність виробництва, так і на ресурс роботи обладнання. Однак ця тема й досі лишається недостатньо дослідженою в контексті системного енергоменеджменту підприємств харчової промисловості.

Тому питання оптимізації перехідних процесів і впровадження енергоощадних алгоритмів керування роботою обладнання є не лише актуальним, а й надзвичайно перспективним напрямом інженерних розробок у сфері харчових технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом питання енергоефективності

у харчовій промисловості набуло особливої актуальності. Підвищення вартості енергоносіїв, посилення вимог до сталого виробництва та загальносвітовий тренд на енергозбереження змушують підприємства переосмислювати підходи до експлуатації технологічного обладнання. Все частіше звучить думка про необхідність не лише заміни застарілих агрегатів, а й глибшого аналізу процесів, які відбуваються під час роботи вже наявних машин.

У фокусі сучасних досліджень – оптимізація енергоспоживання не лише в сталих, а й у перехідних режимах. Саме ці режими, що виникають під час запуску, зупинки чи зміни параметрів обладнання, часто залишаються поза увагою, хоча насправді можуть формувати до 30 % від загального обсягу витрат енергії. Саме тому сьогодні дослідники все частіше звертаються до теми математичного моделювання динаміки машин, адаптивного керування, частотного регулювання та впровадження цифрових технологій моніторингу [1–3].

Використання інструментів цифрового моделювання, зокрема концепції цифрового двійника (xDT), дозволяє не тільки візуалізувати роботу технологічного обладнання, а й пророховувати його поведінку в реальному часі, враховуючи теплові, інерційні та кінематичні властивості [2]. Поряд з цим, у закордонній науковій літературі активно вивчаються методи зменшення енерговитрат під час термічної обробки, сушіння, охолодження та транспортування продуктів [4–5]. Увагу приділено також застосуванню енергоощадних технологій, які зменшують не лише витрати енергії, а й втрати поживних речовин у продуктах.

Актуальною темою сьогодення в галузі харчової промисловості є впровадження енергоощадних рішень на рівні технологічного обладнання. Незважаючи на помітний прогрес у цій галузі, в українському виробничому середовищі ще не склалася система, яка б повною мірою враховувала енергоспоживання саме в перехідних режимах. Тому нині важливо не лише адаптувати існуючі міжнародні підходи, а й створити власні ефективні рішення, з урахуванням специфіки українських підприємств.

Постановка завдання. Метою даної роботи є створення інженерно обґрунтованих підходів до підвищення енергоефективності обладнання харчових виробництв шляхом оптимізації перехідних процесів. Додаткову увагу приділено частотному регулюванню, цифровому

керуванню, адаптивним алгоритмам та моніторингу технічного стану агрегатів у реальному часі.

Матеріали і методи дослідження. У дослідженні використано дані експлуатації обладнання харчових виробництв – мішалок, насосів і теплових апаратів. Аналіз перехідних процесів здійснено на основі математичного моделювання з використанням *MATLAB Simulink* та *Mathcad*. Енерговитрати в динамічних режимах визначалися за показниками струму, моменту та температури. Застосовувалися частотні перетворювачі *Schneider Altivar* для адаптивного регулювання. Моніторинг технічного стану проводили за допомогою термодатчиків і енергометрів *Energomera*. Ефективність визначали за зниженням енергоспоживання, тривалістю перехідних режимів та навантаженням на вузли.

Виклад основного матеріалу. У сучасному виробництві харчової продукції технологічне обладнання працює не лише в сталих, а й у динамічних режимах, що виникають при його запуску, зупинці чи зміні технологічних параметрів. Саме ці перехідні процеси супроводжуються суттєвими енерговитратами, які в умовах зростання цін на енергоносії та екологічних вимог не можна ігнорувати. Метою першого етапу дослідження було моделювання та аналіз параметрів перехідних процесів для типового обладнання харчових виробництв – насосів, мішалок і теплових апаратів – з метою виявлення їхнього впливу на загальну енергоефективність виробничих ліній.

На основі даних, отриманих із промислових об'єктів, було змодельовано поведінку струму, моменту та температури під час запуску обладнання. Результати подано на рисунку 1, де зображено динаміку споживаного струму насосним агрегатом.

Як видно з графіка 1, на старті виникає короткочасний пік споживання, який перевищує номінальне значення у 2–3 рази. Саме в цей момент електродвигун перебуває під максимальним навантаженням, що створює високий пусковий момент та теплове перевантаження обмоток. За відсутності регулювання це призводить до підвищеного зношування та значних енергетичних витрат [6; 8].

Аналогічні явища спостерігаються в роботі мішалок, особливо тих, що обслуговують в'язкі маси. На рисунку 2 наведено графік порівняння моменту інерції обертання ротора у випадках різної маси навантаження.

При зростанні моменту інерції вдвічі, тривалість виходу на номінальну швидкість зростає майже в 1,6 раза, що відповідно збільшує витрати енергії на фазу запуску. Така залежність підкреслює необхідність врахування масогабаритних характеристик оброблюваного середовища при проєктуванні та керуванні обладнанням [7].

У таблиці 1 представлено типові параметри перехідних процесів для насосів, мішалок і теплових апаратів. Враховано три ключові характеристики: тривалість виходу на номінальний режим, пікове навантаження (струм) та теплові втрати.

У контексті підвищення ефективності функціонування технологічних машин особливого

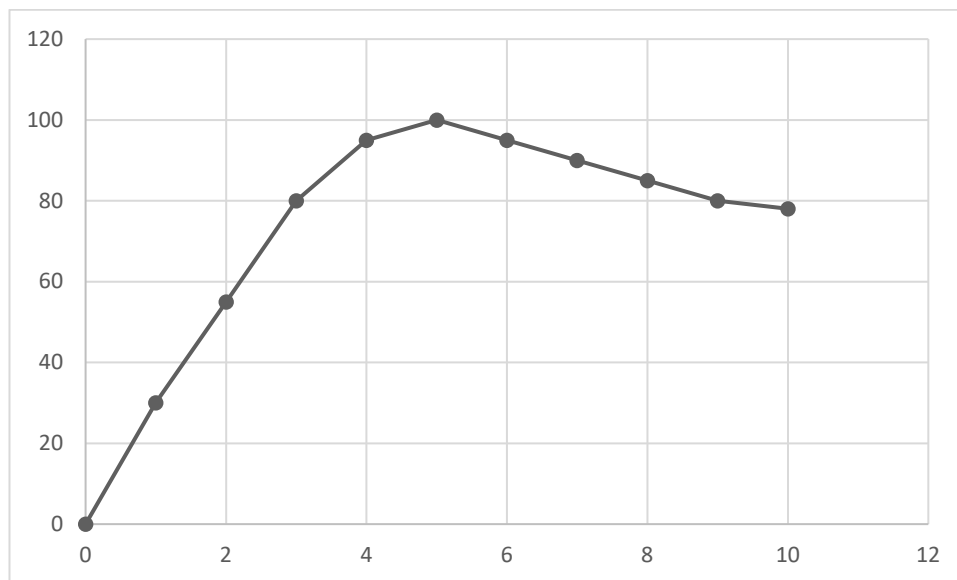


Рис. 1. Динаміка споживаного струму насосного агрегата

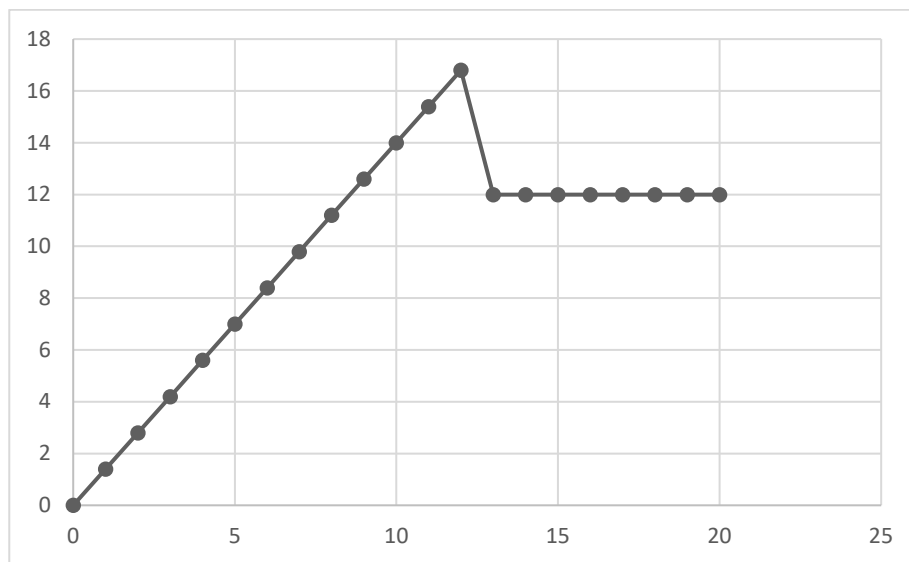


Рис. 2. Порівняння моменту інерції обертання ротора залежно від маси навантаження

Таблиця 1

Параметри перехідних процесів

Тип обладнання	Тривалість виходу на номінальний режим, с	Пікове навантаження, % від номінального	Теплові втрати, % від загального бюджету
Насос	7.5	275	14
Мішалка	10.2	230	13
Тепловий апарат	5.8	190	10

значення набуває аналіз перехідних процесів, що супроводжують запуск, зупинку або зміну режимів роботи агрегатів. Ці процеси безпосередньо впливають на динаміку навантажень, теплові втрати й загальний ресурс експлуатації обладнання. Наприклад, у насосів середнього класу тривалість перехідного процесу становила 6–9 с, а пікові навантаження досягали 275 % від номінальних. Для мішалок із густими середовищами пікове значення моменту складало понад 230 %, а теплові втрати в обмотках під час запуску сягали 12–15 % загального теплового бюджету обладнання [6; 7]. У теплових апаратах значущими є температурні коливання в теплообмінних трубках, які призводять до термічної деформації і втоми матеріалів, особливо під час швидких запусків чи частих зупинок [9; 10].

Особливо актуальним у цьому контексті стає впровадження систем енергетичної рекуперації, які дозволяють зменшити втрати енергії під час перехідних режимів, особливо в динамічно навантажених сегментах виробництва. У деяких технологічних машинах – зокрема, в укладальниках, що працюють з високою циклічністю, – використання рекупераційних модулів дає змогу частково відновлювати кінетичну та теплову енергію, накопичену в перехідних фазах, і спрямовувати її на повторне живлення систем. Такий підхід не лише підвищує енергетичну ефективність, але й знижує амортизаційні навантаження на обладнання.

Таким чином, результати дослідження показали, що перехідні процеси здатні формувати до 30 % загальних енергетичних витрат технологічного обладнання. Їх вплив є особливо значущим у випадках частих циклів вмикання/вимикання, неперервного переналаштування режимів або при недостатньо точному керуванні пусковими параметрами [8]. Втрачену енергію не лише складно компенсувати, але й вона генерує додаткове тепло, що може потребувати додаткових витрат на охолодження. В умовах промислової експлуатації це призводить до перевантаження вузлів, зниження ресурсу роботи та збільшення витрат на технічне обслуговування.

Оптимізація перехідних процесів технологічного обладнання у харчовій промисловості передбачає не лише ідентифікацію надлишкових енерговитрат, але й пошук технічних рішень для їхнього зниження. У цьому контексті особливу роль відіграють частотні перетворювачі та адаптивні системи керування, які забезпечують гнучке регулювання режимів роботи,

зменшення навантажень на вузли та підвищення загальної енергоефективності. Завдяки оптимізації динаміки пуску й зупинки, такі системи дозволяють уникати критичних пікових навантажень у ключових технологічних машинах, що працюють із перервним або змінним навантаженням. Особливо це стосується обладнання з високим моментом інерції – наприклад, укладальників, мішалок чи насосів. Упровадження технологій енергетичної рекуперації в таких агрегатах дає змогу не лише гасити надлишкову енергію, а й повертати її в систему, зменшуючи сумарне енергоспоживання. У результаті перехідні процеси стають контрольованими і передбачуваними, що позитивно впливає на тривалість служби обладнання та тепловий режим його елементів.

У дослідженні розглянуто впровадження частотних перетворювачів Schneider Electric Altivar 312 ATV312HU22N4 2,2 кВт 380 В (рис. 3) та проаналізовано результати їх роботи порівняно з класичними схемами керування.



Рис. 3. Перетворювач Schneider Electric Altivar 312 ATV312HU22N4

На рисунку 4 подано результати запуску мішалки з в'язким середовищем у стандартному режимі та з частотним регулюванням.

Як видно з рисунку 4, класичний пуск супроводжується стрибкоподібним ростом обертів, що викликає пікове навантаження на електропривід і сильні температурні коливання в обмотках. Натомість, використання частотного регулятора забезпечує плавне наростання швидкості, зменшуючи струмовий пік на 48 % та скорочуючи



Рис. 4. Динаміка запуску мішалки: класичне керування проти частотного регулювання

тривалість виходу на номінальний режим майже на 35 %. Таке керування дозволяє знизити термічне навантаження на двигун, зменшити вібрації та підвищити ресурс механічної частини обладнання, що підтверджується в роботах [6; 7].

У таблиці 2 узагальнено результати порівняння енергоспоживання у перехідних режимах за умов класичного та частотного керування.

Таблиця 2
Порівняльна характеристика енергоспоживання у перехідних режимах

Тип обладнання	Класичне керування (кВт·год)	Частотне керування (кВт·год)	Економія (%)
Насос	3.9	2.8	28.2
Мішалка	4.5	3.39	24.7

Наведені дані демонструють, що при використанні частотного перетворювача середнє енергоспоживання в перехідному режимі зменшилось із 3,9 кВт·год до 2,8 кВт·год для насосного агрегату середнього класу, що становить економію на рівні 28,2 %. Аналогічні результати були отримані й для мішалок – енергоспоживання зменшилося на 24,7 %. Крім того, зниження пікового струмового навантаження на двигун у режимі запуску (рис. 5) досягло 41–53 % в залежності від типу обладнання, що значно зменшило теплове старіння та знос обмоток.

Суттєве покращення показників також забезпечує адаптивне керування, яке реалізується через поєднання частотного регулювання з контролем технологічних параметрів у реальному часі. Розроблений алгоритм модульного

автоматизованого керування включає чотири етапи: 1) діагностика навантаження; 2) вибір оптимального закону зміни частоти; 3) контроль за температурою, моментом та частотою обертання; 4) корекція алгоритму в залежності від поточного стану системи. Такий підхід забезпечує не лише зниження енергоспоживання, а й динамічну адаптацію до змін середовища чи обсягу обробки.

Сучасні технологічні машини харчових виробництв, зокрема укладальники, фасувальні автомати та дозатори, працюють у режимах з високою частотою запусків і зупинок, що значно підсилює динамічні навантаження на вузли приводу. У таких умовах надзвичайно перспективним є впровадження систем енергетичної рекуперації – зворотного повернення енергії, що вивільняється при гальмуванні рухомих елементів машин, у мережу або живлення допоміжних систем. Зокрема, у випадку укладальників, які працюють циклічно з чергуванням фази розгону та гальмування, використання рекупераційних перетворювачів дозволяє перетворювати надлишкову кінетичну енергію у корисну електричну [11].

Такий підхід не лише знижує сумарне енергоспоживання, а й зменшує нагрів обмоток двигунів, підвищує ресурс гальмівних систем і сприяє стабілізації перехідних процесів. На рівні керування доцільно застосовувати рекупераційні модулі в поєднанні з адаптивним ПІ-регулюванням і цифровим прогнозуванням навантаження, що особливо ефективно в умовах варіативного навантаження на привод (наприклад, при укладанні продукції різної маси чи

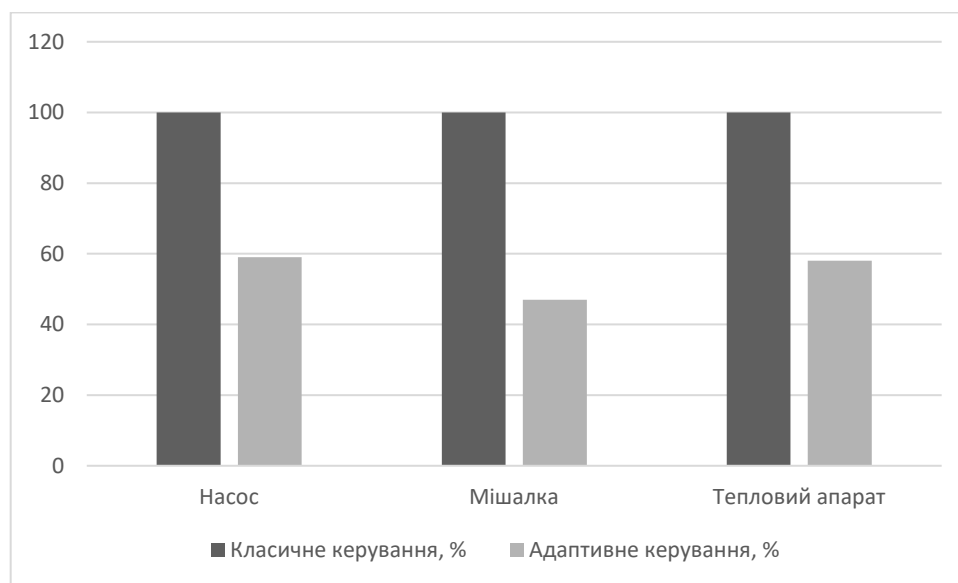


Рис. 5. Зниження пікового струмового навантаження при адаптивному запуску

конфігурації). Впровадження таких рішень дозволяє досягти комплексного підвищення енергоефективності, з одночасною економією електроенергії на 12–18 % у кожному робочому циклі, що підтверджено в дослідженнях [12].

Важливо, що реалізація адаптивного керування дозволила зменшити коливання температури в обмотках електроприводів на 7–10 °C у порівнянні зі стандартним режимом, що продовжує термін їх служби щонайменше на 15–20 %. Підтвердження цьому знаходимо у сучасних дослідженнях, які доводять залежність енергоспоживання від плавності керування у динамічних режимах [8, 9], а також у моделюваннях щодо ефективності теплових режимів у харчовому обладнанні [10, 11].

Оптимізація перехідних процесів у технологічних машинах харчової промисловості спрямована на зниження надлишкових енерговитрат і стабілізацію динаміки запуску та зупинки. Частотні перетворювачі та адаптивні системи керування дозволяють гнучко регулювати режими, зменшувати навантаження та втрати, а також активувати механізми енергетичної рекуперації. Ефективність таких рішень значною мірою залежить від точної прив'язки до технологічної карти виробництва, адже зміна режиму в одному вузлі може впливати на весь процес [12]. Особливо це важливо для обладнання з високою інерційністю – насосів, мішалок, укладальників.

У межах дослідження було створено цифрову модель технологічного процесу з подальшою інтеграцією в систему автоматичного керування, яка дозволяє в режимі реального часу аналізувати і враховувати такі змінні параметри, як

густина середовища, температурний градієнт, тривалість і фази технологічного циклу. Завдяки цьому алгоритм керування динамічно підлаштовується під поточні умови роботи технологічних машин, забезпечуючи стабілізацію динаміки, мінімізацію пікових навантажень, згладжування перехідних процесів і загальну стійкість системи. Особливе значення має реалізація функцій енергетичної рекуперації, що дозволяє перетворювати надлишкову енергію перехідних режимів на корисну, підвищуючи загальну ефективність. Така інтеграція цифрових моделей у виробничі цикли дозволяє досягати економії енергії до 25 % без втрати продуктивності, з одночасним зниженням зносу вузлів та підвищенням надійності роботи технологічного обладнання.

Цифровий моніторинг технічного стану устаткування набуває дедалі більшого значення в умовах індустрії 4.0, особливо коли йдеться про технологічне обладнання харчових виробництв, де стабільність і довговічність агрегатів мають безпосередній вплив на якість і безпеку продукції [13]. У рамках дослідження було впроваджено систему моніторингу на базі енергометрів Energometa та термодатчиків контактного типу, що дозволило у реальному часі фіксувати зміни струму, температури й вібраційних параметрів під час перехідних режимів роботи обладнання.

Одним із ключових результатів стало виявлення значного зниження температурного навантаження після впровадження системи цифрового контролю. На рисунку 6 показано, як змінюється температурний профіль теплового апарата при запуску до й після встановлення моніторингового модуля.

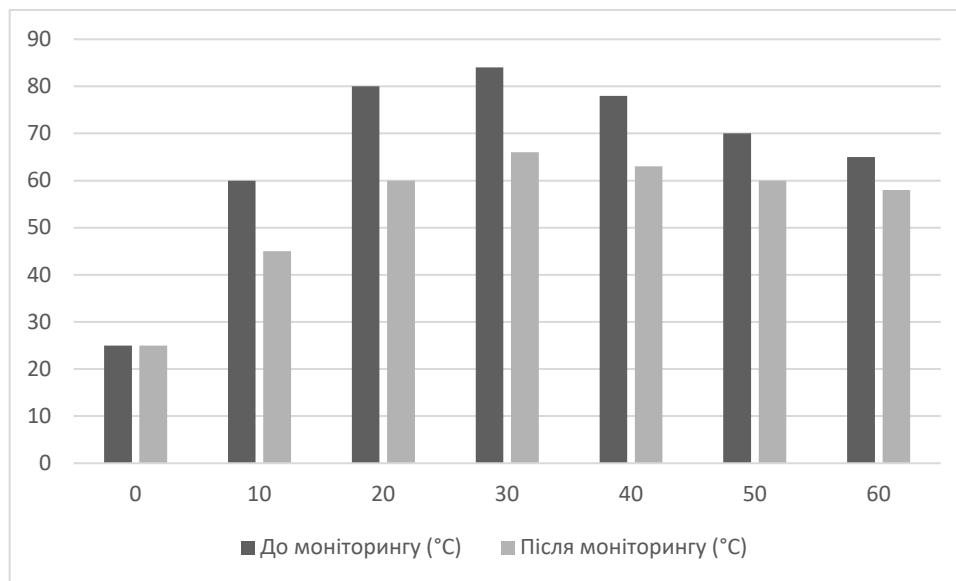


Рис. 6. Температурний профіль теплового апарата при запуску

До впровадження система фіксувала пікові значення температури, що досягали 84 °С із тривалим спадом до робочого рівня. Після оптимізації перехідного режиму та впровадження частотного регулювання температурна крива стала більш плавною, пікові значення зменшилися до 66 °С, а час виходу на стабільний рівень скоротився вдвічі. Це свідчить про зменшення теплових ударів, що в перспективі дозволяє знизити ризик перегріву матеріалів і запобігти передчасному зносу елементів системи.

У таблиці 3 узагальнено результати вібраційного й температурного моніторингу на трьох типах обладнання.

Таблиця 3
Результати вібраційного й температурного моніторингу

Тип обладнання	Скорочення вібраційної амплітуди (%)	Зниження пікової температури (%)
Мішалки	31	22
Насоси	27	19
Теплові апарати	18	16

Найбільше скорочення вібраційної амплітуди було зафіксовано у мішалках – до 31 %, що пов'язано з пом'якшенням пускових режимів і зменшенням механічного ударного навантаження, а також стабілізацією динаміки роботи привідних вузлів. У насосах вібраційне навантаження зменшилось на 27 %, тоді як у теплових апаратах – до 18 %. Зниження пікових температурних показників становило

в середньому 16–22 %, залежно від конфігурації теплообміну та умов експлуатації.

Завдяки тривалому збору даних, а також використанню Mathcad для математичного прогнозування зносу елементів, вдалося змодельовати вплив оптимізованих перехідних процесів на ресурс основних вузлів (рис. 7).

Як видно з рисунку 7, найбільший приріст ресурсу спостерігається у підшипникових вузлах мішалок – до 26 %, що зумовлено стабілізацією обертів під час запуску та зниженням вібраційного навантаження. Електродвигуни насосів демонструють подовження міжремонтного періоду на 19 %, зумовлене зменшенням пікових струмів і температур у фазі старту. У теплових апаратах подовження строку служби трубчастих елементів становить до 17 % завдяки зменшенню амплітуди температурних коливань при запуску, що знижує ризик термічних деформацій і мікротріщин. Отже, впровадження адаптивного керування та частотного регулювання не лише знижує енергоспоживання, а й істотно покращує довговічність обладнання, оптимізуючи технічне обслуговування та зменшуючи загальні експлуатаційні витрати.

Системи моніторингу також дозволили реалізувати концепцію предиктивного обслуговування: замість планової заміни агрегатів через фіксований час, обслуговування тепер може базуватися на реальному технічному стані вузлів. Це забезпечує точне відстеження динаміки зносу компонентів, дозволяє прогнозувати критичні перехідні процеси та своєчасно вживати заходів для уникнення аварійних ситуацій. Таким чином,

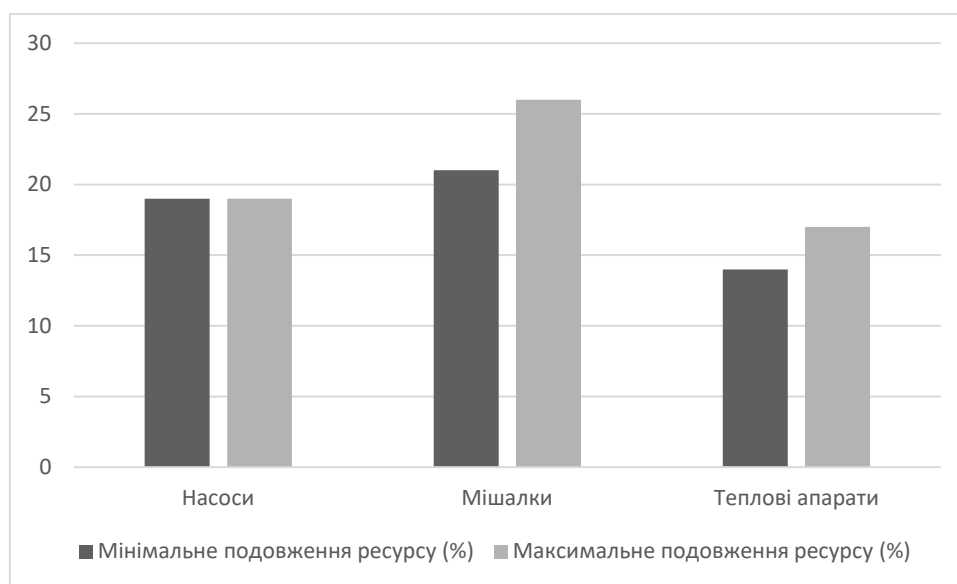


Рис. 7. Прогнозоване подовження ресурсу обладнання після оптимізації перехідних процесів

підвищується надійність функціонування ключових технологічних машин і зменшуються витрати на утримання обладнання. Одночасно, за рахунок точного контролю режимів навантаження, активується потенціал енергетичної рекуперації – повернення надлишкової енергії в систему під час гальмування або переходу в менш енергоємні стани.

Загалом результати дослідження підтвердили, що цифровий моніторинг технічного стану в поєднанні з адаптивним керуванням дає змогу істотно знизити енергоспоживання в перехідних режимах, зменшити механічне й термічне навантаження на елементи обладнання, а також суттєво подовжити їхній ресурс. З огляду на це, системи з підтримкою рекуперації та інтелектуального керування слід розглядати як доцільне рішення для впровадження в технологічні процеси харчової промисловості, де стабільність і ефективність є критично важливими.

Висновки. Результати дослідження підтвердили ефективність оптимізації перехідних процесів як дієвого засобу підвищення енергоефективності технологічного обладнання в харчовій промисловості. Було доведено, що динамічні режими – запуск, зупинка, перехід між технологічними параметрами – можуть формувати до 30 % загального енергоспоживання, спричиняючи зростання температурних і вібраційних

навантажень та зниження ресурсу вузлів. Застосування частотних перетворювачів Schneider Altivar у поєднанні з адаптивними алгоритмами керування дозволило знизити середнє енергоспоживання у перехідних режимах на 24,7–28,2 %, а пікове струмове навантаження – до 53 %. Впровадження системи цифрового моніторингу (Energomera, термодатчики) забезпечило контроль за температурою і вібраціями в реальному часі, що дозволило перейти до предиктивного обслуговування. Математичне прогнозування у Mathcad засвідчило, що подовження ресурсу обладнання становить: для електродвигунів насосів – 19 %, підшипників мішалок – до 26 %, трубчастих елементів теплових апаратів – до 17 %. Інтеграція цифрових моделей у виробничі карти забезпечила гнучке налаштування алгоритмів під конкретні технологічні умови, підвищивши надійність та ефективність процесів. Результати дослідження підтверджують доцільність впровадження адаптивного частотного керування і цифрового моніторингу як комплексної системи енергоменеджменту на харчових підприємствах. Отримані дані можуть бути використані для модернізації наявного обладнання, розробки нових енергоощадних виробничих ліній і формування довгострокової стратегії сталого розвитку харчової галузі України.

Список літератури:

1. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Омельченко О. В. Шляхи вирішення питання оптимального вибору обладнання для охолодження та заморожування продуктів харчування на основі оцінки його енергоефективності. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2022. Т. 44, № 1. С. 66–76.

2. Eppinger T., Longwell G., Mas P., Goodheart K., Badiali U., Aglave R. Increase food production efficiency using the executable digital twin (xDT). *Chemical Engineering Transactions*. 2021. Vol. 87. P. 37–42.
3. Padhiary M. Bridging the gap: Sustainable automation and energy efficiency in food processing. *Agricultural Engineering Today*. 2023. Vol. 47, No. 3. P. 47–50.
4. Adnoui M., Jiang L., Zhang X. J., Zhang L. Z., Pathare P. B., Roskilly A. P. Computational modelling for decarbonised drying of agricultural products: Sustainable processes, energy efficiency, and quality improvement. *Journal of Food Engineering*. 2023. Vol. 338. Article 111247.
5. Arya S. S., More P. R., Ladole M. R., Pegu K., Pandit A. B. Non-thermal, energy efficient hydrodynamic cavitation for food processing, process intensification and extraction of natural bioactives: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023. Vol. 98. Article 106504.
6. Криворотько В. М., та ін. Динаміка і рекуперація вторинних енергетичних ресурсів у механічних системах. *Наукові праці НУХТ*. 2014. Т. 20, № 1. С. 171–180.
7. Степанець О. І., Пригодій Д. В., Ткачук Н. А. Динаміка і енергетична рекуперація в технологічних машинах. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23, № 5, ч. 2. С. 26–32.
8. Abeykoon C., McMillan A., Nguyen B. K. Energy efficiency in extrusion-related polymer processing: A review of state of the art and potential efficiency improvements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 147. Article 111219.
9. Erdogdu F. Mathematical modeling of food thermal processing: Current and future challenges. *Current Opinion in Food Science*. 2023. Vol. 51. Article 101042.
10. Szpicer A., Bińkowska W., Wojtasik-Kalinowska I., Salih S. M., Półtorak A. Application of computational fluid dynamics simulations in food industry. *European Food Research and Technology*. 2023. Vol. 249, No. 6. P. 1411–1430.
11. Dezhdar A., Assareh E., Agarwal N., Keykhah S., Aghajari M., Lee M. Transient optimization of a new solar-wind multi-generation system for hydrogen production, desalination, clean electricity, heating, cooling, and energy storage using TRNSYS. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 208. P. 512–537.
12. Yu H., Mei J., Xie J. New ultrasonic assisted technology of freezing, cooling and thawing in solid food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Vol. 90. Article 106185.
13. Ismail M. I., Yunus N. A., Hashim H. Integration of solar heating systems for low-temperature heat demand in food processing industry – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 147. Article 111192.

Skuibida Ye.L. IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF FOOD PRODUCTION EQUIPMENT BY OPTIMIZING TRANSIENT PROCESSES

The issue of energy efficiency in the food industry has gained significant importance due to the rising cost of energy resources, tightening environmental requirements, and the need to implement sustainable production approaches. This article explores one of the effective ways to improve the energy efficiency of technological equipment in food processing through the optimization of transient processes – dynamic operational modes that occur during equipment start-up, shutdown, or transition between technological parameters. A substantial portion of energy consumption at production facilities is attributed to transient processes, which are often overlooked during operational planning, leading to unnecessary energy losses and reduced equipment lifespan. The study analyzes common transient processes that occur in thermal and mechanical equipment used for various food production purposes. A mathematical model is developed to describe their behavior, taking into account thermophysical, kinematic, and inertial parameters that influence process stability and control accuracy. Particular attention is paid to the implementation of frequency regulation of electric drive speed, the application of adaptive control systems, modular automation solutions, and the use of real-time condition monitoring systems for key production units. Based on the obtained experimental and simulation results, the effectiveness of the implemented solutions has been confirmed: the average reduction in energy consumption during transient modes amounted to 24.7–28.2%, peak current loads were reduced by up to 53%, vibration loads – by up to 31%, and thermal overloads – by 16–22%. The optimization of transient processes contributed to an extended service life of the equipment: electric motors – by 19%, bearing units – up to 26%, and heat exchange elements – by 17%, all achieved without compromising the stability or quality of the production process. As a result, practical recommendations are provided for the implementation of optimized control algorithms under actual industrial conditions. The findings of the article can be applied for the modernization of existing production lines, the design of new energy-efficient technological systems, and the development of energy management policies within food industry enterprises.

Key words: energy efficiency, food industry, transient processes, frequency regulation, mathematical modeling, equipment lifespan, adaptive control.