

УДК 621.87

DETERMINATION OF POWER AND ENERGY INDICATORS OF VACUUM GENERATORS WITH ENERGY SAVING FUNCTION

V. Yakymchuk, O. Gavva, M. Yakymchuk
National University of Food Technologies

Key words:	ABSTRACT
vacuum, suction, vacuum generator, energy saving, packaging, mathematical model Article history: Received 29.08.2024 Received in revised form 26.09.2024 Accepted 02.10.2024 Corresponding author: mykolaikymchuk.2016@gmail.com	Generators with the function of energy saving belong to a new group of designs of vacuum generators, which is just beginning to develop. At the research stage, the complex task of determining the kinematic characteristics of the movement of the device for capturing the device during the movement of the package in space was considered for three typical cases when the vectors of the forces of weight, inertia and resistance of the external environment coincide with the axes of the coordinates of the movement of the package in the vertical plane (lifting operation); movement in the horizontal plane (movement operation) and movement in the OXZ plane are combined in time. Taking into account the elastic properties of the gripping elements, the gripping device with packaging is presented in the form of a two-mass discrete model, which consists of a driving mass in the form of combined mass elements of a vacuum drive with a gripping head and a packing mass. The developed mathematical models for ensuring the movement of the gripping device allow to determine the kinematic parameters of the movement of the package according to the known law of motion of the gripping device. The change in the amount of rarefaction in the elements during the holding of the package and during its movement was studied. The proposed approach to determining the holding power of a package with a vacuum suction cup takes into account the requirements for the operation of vacuum generators with an energy saving function. The results of theoretical studies showed that the most necessary when moving the package is the combination of movements in the vertical and horizontal planes, the value of which is recommended to be taken as the maximum when the generator with the energy saving function is working. The obtained changes in the amount of vacuum depending on the diameter of the suction cup for packaging from different packaging materials.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-15

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛОВИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВАКУУМНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ІЗ ФУНКЦІЄЮ ЕНЕРГОЗАОЩАДЖЕННЯ

В. М. Якимчук, д-р філ. наук

О. М. Гавва, д-р техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-2938-0230>

М. В. Якимчук, д-р техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-1905-3546>

Національний університет харчових технологій

Запропонований комплексний підхід до визначення зусилля утримання упаковок вакуумним присмоктувачем з урахуванням експлуатаційних вимог до вакуумних генераторів з функцією енергозбереження. Результати аналітичних досліджень показали, що найбільший вакуум спостерігається під час піднімання упаковок шляхом суміщення рухів по вертикальній і горизонтальній площинах, величина якого рекомендується приймати за максимальне значення при роботі генератора з функцією енергозбереження. Отримані закономірності зміни величини вакууму від діаметра присмоктувача для упаковок з різного типу пакувального матеріалу.

Ключові слова: вакуум, присмоктувач, вакуумний генератор, енергозбереження, упаковка, математична модель.

Вступ. Для утворення групової упаковки з харчовими продуктами вкладання штучних і дрібноштучних виробів у тару використовують вакуумні пристрої захоплення. Традиційна система вакууму складається з двох основних елементів — присмоктувачів і пристрою створення вакууму. Існують два основні способи створення вакууму: за допомогою вакуумного насоса, який відкачує повітря з резервуару, та використання ежекторів, які створюють вакуум завдяки кінетичній енергії стисненого повітря. В пакувальному обладнанні вакуум здебільшого створюється за допомогою ежекторів, оскільки цей спосіб є більш економічним. На ринку України споживачам пропонується широкий асортимент вакуумних генераторів, що мають додаткові технологічні функції, такі як вмикання та вимикання вакуумного генератора, подача імпульсу для відриву упаковки від елементів захоплення, додаткове очищення повітря, контроль глибини вакууму тощо.

У зв'язку з тим, що пакувальне обладнання є складним мехатронним комплексом і потребує швидкої реакції для підтвердження виконання кожної технологічної операції, включаючи захоплення упаковок за допомогою вакуумних елементів захоплення, можна стверджувати, що використання вакуумних генераторів з повним спектром додаткових технологічних функцій є оптимальним конструкторським рішенням.

Одним із важливих недоліків вакуумних генераторів є значні витрати стисненого повітря, що призводить до підвищення собівартості продукції. Так при перенесенні упаковки пристроєм захоплення потрібно подавати стиснене повітря на генератор з моменту виконання операції захоплення, піднімання, перенесення та опускання до моменту відділення упаковки від елемента захоплення. Це призводить до значних витрат стисненого повітря.

Генератори з функцією енергозаощадження відносять до нової групи конструкцій вакуумних генераторів, яка тільки починає активно розвиватись. А тому для зниження енергетичних витрат під час створення розрідження для виконання тех-

нологічних операцій є розробка нових моделей вакуумних генераторів і методик визначення величини розрідження під час налаштування вакуумної системи.

Огляд останніх досліджень і публікацій. У працях [1—9] наводиться опис видів і типів пристроїв захоплення з пневматичним приводом та методик їх розрахунку. Однак із застосуванням нових пакувальних матеріалів, зменшенням їх товщини та збільшенням повітропроникності ці методики потребують доповнення й уточнення. Поряд із цим не враховано особливості роботоздатності нових вакуумних генераторів.

У працях [4—9] розглянуто застосування вакуумних пневматичних пристроїв для захоплення виробів. Наведені методики розрахунку і підбору вакуумних пристроїв захоплення не враховують зміну величини вакууму в процесі переміщення упаковки при суміщенні руху в різних площинах і можуть лише наближено використовуватись для визначення його мінімального та максимального значення при налаштуванні вакуумних генераторів із функцією енергозаощадження.

У зарубіжних інформаційних джерелах питанням розрахунку вакуумних пристроїв захоплення присвячені праці [7, 8]. Аналіз праць показує, що з розвитком конструкції та системи керування пневматичними приладами в математичних моделях потрібно враховувати технічні характеристики елементів керування, спосіб регулювання параметрів і можливість постійного контролю за процесом виконання ними функцій.

Мета дослідження: визначення енергетичних показників створення величини вакууму з метою налаштування вакуумних генераторів з функцією енергозаощадження під час виконання операцій пакування. Пропонується умову перевірки утримання і переміщення упаковки вакуумним пристроєм захоплення здійснювати за трьома показниками експлуатаційних вимог, що передбачає застосування комплексного підходу дослідження.

Матеріали і методи. Об'єктом дослідження є енергетичні витрати вакуумних генераторів з функцією енергозаощадження. Основним методом визначення енергетичних показників величини вакууму є аналітичний опис умови утримання та переміщення упаковки пристроєм захоплення.

Результати досліджень. Аналіз типових конструкцій (рис. 1) вакуумних генераторів з функцією енергозаощадження показав, що вони мають електронну систему керування 1, яка забезпечує створення вакууму заданої величини ежектором 2, систему очистки 4 та слідкування за його параметрами через зворотний зв'язок системи слідкування 3. Запропоновані системи працюють локально і є автономними елементами.

Робота вакуумного генератора з функцією енергозаощадження передбачає три етапи (рис. 2). На першому відбувається захоплення упаковки шляхом вмикання ежектора та початок утворення вакууму (точка А, рис. 2). Величину створеного вакууму вимірює датчик тиску, який через систему зворотного зв'язку передає сигнал на електронну систему керування. Після досягнення попередньо заданого рівня вакууму (точка В, рис. 2), електронна система керування відключає подачу стисненого повітря на ежектор та перекриває отвір 2, герметизуючи порожнину елемента пристрою захоплення з упаковкою.

Зменшення сформованого вакууму забезпечує необхідне зусилля утримання упаковки, а електронна система генератора дає команду на виконання наступних операцій. Генератор переходить до другого етапу роботи.

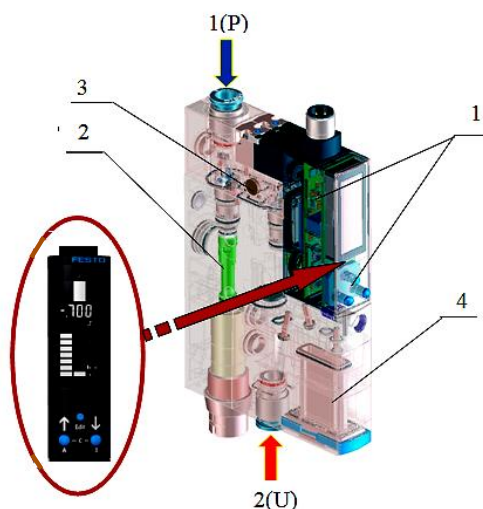


Рис. 1. Конструкція вакуумного генератора з функцією енергозбереження:

- 1 — електронна система керування; 2 — ежектор для виробництва вакууму;
 3 — система слідування за параметрами вакууму через зворотній зв'язок;
 4 — система очистки

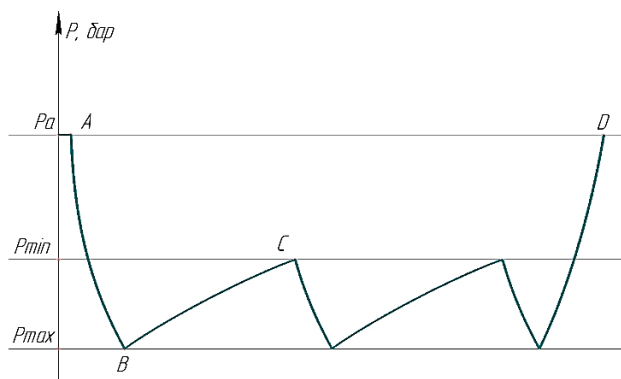


Рис. 2. Зміна вакууму під час роботи вакуумного генератора з функцією енергозощадження

Залежно від виду матеріалу упаковки та ступеня зношення елемента присмоктування в герметичній порожнині відбувається підсмоктування повітря з навколишнього середовища, що призводить до часткового падіння рівня вакууму.

Другий етап роботи характеризується циклічною роботою генератора, де послідовним повторенням є утримання значення вакууму в заданих межах (точка C, рис. 2).

Третій етап характеризується завершенням переміщення упаковки в зону вивантаження та її відриву від елемента пристрою захоплення (точка D, рис. 2).

На першому етапі дослідження розглянуто задачу визначення величини кінематичних характеристик руху пристрою захоплення при перенесенні упаковки в просторі для трьох типових випадків, коли напрямки векторів сил ваги, інерції й опору зовнішнього середовища збігаються з осями координат переміщення упаковки у вертикальній площині (операція піднімання), переміщення упаковки в горизонталь-

ній площині (операція переміщення) та переміщення в горизонтальній і вертикальній площинах, суміщеними в часі.

За таких умов коливальну систему вакуумного пристрою захоплення з упаковкою можна навести у вигляді двомасової дискретної моделі, яка складається з ведучої маси у вигляді зведеної маси елементів привода вакуумного енджектора з головкою захоплення m_1 та маси упаковки — m_2 , з'єднаних пружно-віджимним матеріалом присмоктувача, що має жорсткість C_{12} та в'язкість b_{12} (рис. 3).

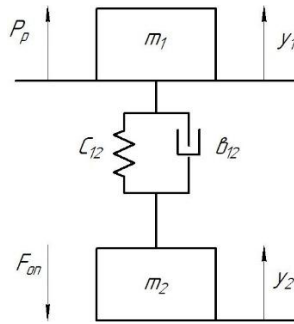


Рис. 3. Двомасова модель переміщення упаковки у вертикальній площині вакуумним пристроєм захоплення

Рух зведених мас під час піднімання упаковки вакуумним пристроєм захоплення можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 = P_p - C_{12}(y_1 - y_2) - b_{12}(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \\ m_2 \ddot{y}_2 = -F_{on} + C_{12}(y_1 - y_2) + b_{12}(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \end{cases} \quad (1)$$

де P_p — рушійна сила привода переміщення пристрою захоплення у вертикальній площині; F_{on} — зведена сила опору переміщення маси m_2 .

Якщо знехтувати перехідними процесами на початковому етапі руху маси m_1 та врахувати що, значення її швидкості є величиною сталою $\dot{y}_1 = \mathcal{Q}_1 = const$, то прискорення системи дорівнює $\ddot{y} = 0$. За таких умов система рівнянь (1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \ddot{y}_2 = \frac{1}{m_2} (C_{12}(\mathcal{Q}_1 t - y_2) + b_{12}(\mathcal{Q}_1 - \dot{y}_2) - F_{on}) \\ b_{12}\dot{y}_2 + C_{12}y_1 = C_{12}\mathcal{Q}_1 t + b_{12}v_1 - P_p \end{cases} \quad (2)$$

З системи рівнянь (2) можна визначити кінематичні параметри переміщення маси m_2 за умови відомої швидкості пристрою захоплення.

Модель переміщення упаковки у горизонтальній площині вакуумним пристроєм захоплення наведена на рис. 4.

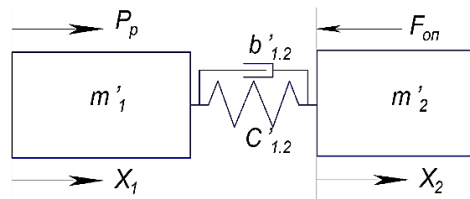


Рис. 4. Двомасова модель переміщення тарного вантажу в горизонтальній площині вакуумним захоплюючим пристроєм

Відповідно до технічних характеристик елементів захоплення, можна прийняти, що вони здебільшого характеризують властивостями, тобто $b_{12} = 0$.

За цих умов переміщення упаковки в горизонтальній площині вакуумним пристроєм захоплювання описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} m_1' \ddot{x}_1 = P_p - C_{12}' (x_1 - x_2); \\ m_2' \ddot{x}_2 = -F_{on}' + C_{12}' (x_1 - x_2) \end{cases} \quad (3)$$

Якщо і в цьому випадку знехтувати перехідними процесами на початковому етапі руху маси m_1 та врахувати, що значення її швидкості є величиною сталою, то прискорення маси m_1 дорівнює $\ddot{x}_1 = 0$. За таких умов прискорення $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \text{const}$ маси m_2 :

$$\ddot{x}_2 = -\frac{F_{on}''}{m_2'} + C_{12}'' \left(\dot{x}_2 t - \dot{x}_2 t + \frac{P_p}{C_{12}} \right) \frac{1}{m_2'} \quad (4)$$

З системи рівнянь (4) можна визначити кінематичні параметри переміщення маси m_2 за умови відомої швидкості руху пристрою захоплювання.

Для підвищення продуктивності обладнання укладання суміщають рух упаковки у вертикальній і горизонтальній площинах. Тоді абсолютне значення прискорення маси m_2 визначається за формулою:

$$\ddot{S} = \sqrt{\ddot{x}_2^2 + \ddot{y}_2^2} \quad (5)$$

На другому етапі досліджено величину вакууму на утримання упаковки в процесі її переміщення під час суміщення рухів у вертикальній і горизонтальній площинах за умови обраного діаметра присмоктувача D та геометричних розмірів упаковки $h \times l$ (рис. 5).

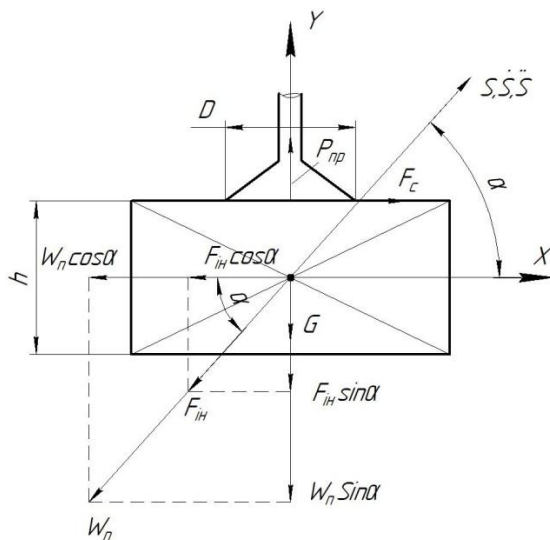


Рис. 5. Схема дії сил на упаковку під час її переміщення при суміщенні рухів у горизонтальній і вертикальній площинах

Приймаємо припущення, що вектори прискорення, швидкості збігаються з напрямком руху упаковки і направлені під кутом α до горизонтальної площини. В процесі переміщення упаковки на неї діють сили, які прагнуть відірвати та зрушити її

відносно присмоктувача. Це сила тяжіння G упаковки, сили інерції F_{in} , сила опору повітря W_n , сила зчеплення між поверхнею упаковки та присмоктувачем F_k .

Сила утримання є складовою двох факторів — ефективної площі контакту присмоктувача до поверхні упаковки для круглих присмоктувачів $f_e = (\pi D^2)/4$ та величини вакууму в камері присмоктувача, який під час практичної експлуатації має менше значення з урахуванням пористої структури (коефіцієнта повітропроникності) пакувального матеріалу упаковки та шорсткості поверхні контакту. В подальшому цей фактор будемо враховувати технологічним коефіцієнтом експлуатації k_1 . Тоді зведену силу утримання упаковки, з урахуванням умов експлуатації присмоктувача, можна визначити:

$$P_{np} = k_1 \cdot f_e (P_1 - P_2), \quad (6)$$

де $k_1 < 1$ — коефіцієнт експлуатації, який враховує характеристику пакувального матеріалу упаковки.

З іншого боку, для запобігання відриву упаковки від присмоктувача під час її транспортування приведена сила утримання має бути більша за сили опору:

$$P_{np} > F_{in} \sin \alpha + W_n \sin \alpha + G. \quad (7)$$

Тоді умова надійного утримання упаковки для вертикального переміщення забезпечується виконанням умови:

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{k_2 ((F_{in} + W_n) \sin \alpha + G)}{k_1 \cdot f_e}, \quad (8)$$

де k_2 — коефіцієнт безпеки для переміщення у вертикальній площині, в галузевому машинобудуванні приймається в межах від 1,5 до 2,5 [1].

На етапі горизонтального переміщення упаковки величина вакууму для запобігання її зсуву відносно елементів пристрою захоплення залежить від шорсткостних властивостей поверхні пакувального матеріалу упаковки. Для врахування такого впливу у формулі для визначення величини вакууму запропоновано використовувати результати проведених експериментальних досліджень для низки типових пакувальних матеріалів:

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{y(F_{зч})}{\mu k_1 f_e \left(1 - \frac{1}{k_4}\right)}, \quad (9)$$

де μ — коефіцієнт зчеплення між кромкою елемента присмоктувача та поверхнею упаковки; $y(F_{зч})$ — експериментально одержані залежності зміни зусилля зчеплення упаковки від величини діаметра присмоктувача. Для проведення дослідження були використані зразки, широко використовувані в пакувальній індустрії марок картону (МО, ММ, Н, НМ тощо) з товщиною від 0,30 мм до 0,50 мм. Характеристики повітропроникності та шорсткості зразків картону визначались за допомогою електронного приладу К513 за методом Бендтсена. Результати дослідження наведено у вигляді рівнянь апроксимації:

- для марки МО: $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,61d + 10,5$ і $R^2 = 1$;
- для марки ММ: $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,53d + 11,8$ і $R^2 = 1$;
- для марки Н: $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,529d + 11,1$ і $R^2 = 1$;
- для марки НМ: $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,424d + 9,9$ і $R^2 = 1$.

У процесі переміщення упаковки висотою $h > 0,5l$ (де l — довжина упаковки) виникає додатковий момент відриву. Для визначення величини вакууму з урахуванням

моменту відриву розглянемо епюру розподілення тиску кромки присмоктувача по поверхні контакту (рис. 6).

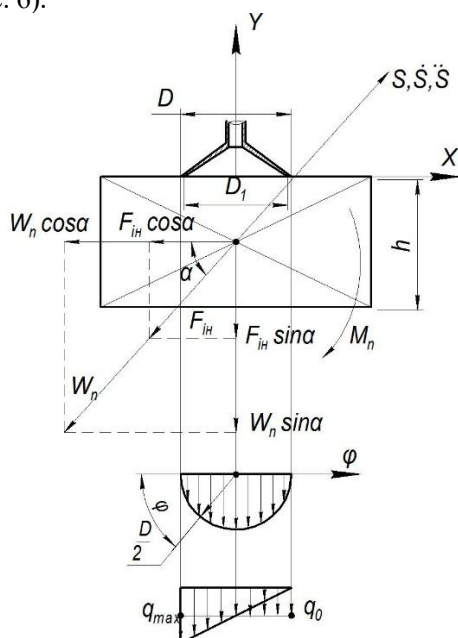


Рис. 6. Схема розподілення тиску по поверхні контакту елемента захоплення з поверхнею упаковки за умови дії додаткового відривного моменту

З епюри видно, що зменшення тиску контакту елемента присмоктувача q_1 може призвести до ймовірного відриву від поверхні упаковки. Зміна тиску контакту з max до min визначається з рівняння:

$$q = q_0 + \frac{M_r}{I_r} r_\varphi, \quad (10)$$

де q_0 — середнє значення тиску за умови його рівномірного розподілення,

$$q_0 = \frac{P_{np}}{f_e} = k_1 (P_1 - P_2), \quad (11)$$

r_φ — кутова координата, яка описує зону зміни тиску: $-D/2 < r_\varphi < D/2$; D — діаметр присмоктувача; I_r — момент інерції опорної площини $I_r = SR^2$, де R — радіус інерції відносно площі опорної поверхні.

Умова, що забезпечує надійний контакт присмоктувача з поверхнею упаковки має вигляд:

$$q < [q], \quad (12)$$

де $[q]$ — допустимий мінімальний тиск між упаковкою і елементами захоплення, що забезпечує утримання упаковки.

Відрив упаковки почнеться при умові $q=0$, за цієї умови визначимо величину вакууму:

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{(F_{in} + W_n) \cos \alpha \cdot \frac{h}{2} \cdot k_5}{k_1 \cdot I_r} \cdot \frac{D}{2}, \quad (13)$$

де k_5 — коефіцієнт безпеки при дії додаткових моментів відриву, в галузевому машинобудуванні приймається 2 [1, 5].

Пропонується, що з трьох показників експлуатаційних вимог (8), (9) та (13) формується комплексна методика визначення максимального та мінімального значень вакууму, які розраховуються за різних умов переміщення упаковки вакуумним пристроєм захоплювання.

Розрахунок величини максимального та мінімального значень вакууму проведено для упаковки прямокутної форми розмірами 400×300×300 мм та масою 25 кг у двох площинах. У вертикальній площині переміщення здійснюється мехатронним модулем з пневматичним приводом з прискоренням 5 м/с², а в горизонтальній площині переміщення здійснюється мехатронним модулем з електричним приводом з прискоренням 8 м/с². Коефіцієнт зчеплення між кромкою присмоктувача та упаковкою становить 0,5; коефіцієнт експлуатації — 0,9; коефіцієнт безпеки під час переміщення тарного вантажу — 1,5.

Вакуумний присмоктувач марки SAF 125 компанії J. Schmalz GmbH має діаметр робочої кромки 118 мм. Результати розрахунку величини вакууму для функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом для утримання упаковки представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Розрахункові значення максимального та мінімального вакууму для мехатронного модуля пристрою захоплювання упаковки з функцією енергозощадження

Показник вимог експлуатації	Математичні моделі	Розрахункові значення вакууму, Па	Прийняті значення вакууму, Па (бар)	Межі регулювання
I	$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{k_2((F_{in} + W_n) \sin \alpha + G)}{k_1 \cdot f_{ex}}$	57 575	57 000 (–0,43)	P_{max}
II	$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{y(F_{34})}{\mu k_1 f_e \left(1 - \frac{1}{k_4}\right)}$	68 799	68 000 (–0,32)	P_{min}
III	$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{(F_{in} + W_n) \cos \alpha \cdot \frac{h}{2} \cdot k_5}{k_1 \cdot I_r} \cdot \frac{D}{2}$	99 967	—	—

Порівняльний аналіз енергоощадних характеристик типового генератора та генератора з функцією енергозощадження за умови визначення показників зміни вакууму за наведеною методикою показано на прикладі компонентів компанії Festo між типовим генератором VN-10-H-T3-PQ2-VQ2-RQ2 та генератора з функцією енергозощадження OVEM-10-H-B-GO-CE-N-2N. За результатами дослідження різниця становить до 4%.

Висновки. Розроблений методологічний підхід до визначення зусилля утримання упаковки вакуумним присмоктувачем з урахуванням експлуатаційних вимог до вакуумних генераторів з функцією енергозощадження показав, що при збільшенні розмірів і маси упаковки з харчовим продуктом зростають динамічні навантаження та, відповідно, величина вакууму. Найбільший вакуум потрібний під час піднімання упаковки шляхом суміщення рухів у вертикальній і горизонтальній площинах, величина якого приймається за максимальне значення при роботі вакуум-генератора. Переміщення упаковки в горизонтальній площині потребує меншої величини вакууму

до 16%, що можна прийняти за мінімальне значення під час роботи генератора. При цьому встановлено, що витрати енергії на роботу генератора з функцією енергозощадження порівняно з типовим генератором зменшується до 4%.

Отримані закономірності зміни величини вакууму від діаметра присмоктувача для упаковки з різного типу пакувального матеріалу на момент їх утримання показують необхідність подальших досліджень, щодо уточнення значення коефіцієнта безпеки в аналітичних моделях, як диференційованої величини, що залежить від діаметра присмоктувача та марки пакувального матеріалу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Павленко, І. І., Годунко, М. О. (2020). *Захватні пристрої роботів*: монографія. Кропивницький: ТОВ «КОД».
2. Filaretov, V. F., Gubankov, A. S., Gornostaev, I. V. (2016). The formation of motion laws for mechatronics objects along the paths with the desired speed. *Proc. of International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications*, 3—5 October, 93—96.
3. Iakymchuk, M., Gavva, O., Bepalko, A. (2014). Research of mechatronik linear module with pneumatic drive on the use of proportional pressure regulators. *Journal of food and packaging science, technique and technologies*, 3, 92—97.
4. Арендаренко, В. М., Іванов, О. М. (2019). *Вакуумна техніка та технологія*: навч. посіб. Полтава: ПДАА.
5. Митропольський, І. Є., Грицак, Р. В. (2018). *Вакуумна техніка*: навч. посіб. Ужгород: УНУ «Говерла».
6. Якимчук, М. В. та ін. (2020). Дослідження впливу конструкцій захоплювальних пристроїв на динаміку роботи лінійних двигунів у мехатронних модулях переміщення упаковок. *Харчова промисловість*, 27, 114—125.
7. Savkiv, V., Mykhailyshyn, R., Duchon, F. (2019). Gasdynamic analysis of the Bernoulli grippers interaction with the surface of flat objects with displacement of the center of mass. *Vacuum*, 159, 524—533.
8. Savkiv, V. et al. (2017). Justification of design and parameters of Bernoulli-vacuum gripping device. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14(6), 1—10.
9. Якимчук, М. В. та ін. (2020). Вплив інерційних і геометричних параметрів вакуумних захоплювальних пристроїв на допустиме зусилля утримання тарноштучних вантажів. *Наукові праці НУХТ*, 26(5), 65—74.