

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.98.04:621.313.333 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).1.119-126](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.119-126)

Р.В. Телюта, доц., канд. техн. наук, **В.В. Клименко**, проф., д-р техн. наук,
О.В. Скрипник, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: teljuta.r@gmail.com*

А.В. Телюта, викл.

Кропивницький аграрний фаховий коледж, м. Кропивницький, Україна

Енергоефективність системи подрібнення твердих рослинних відходів для виробництва біопаливних пелет

Виробництво біопаливних пелет потребує значних енергозатрат під час їх виробництва. На первинному технологічному етапі, а саме подрібненні твердих рослинних відходів, спостерігаються значні втрати електричної енергії пов'язані з нерівномірністю завантаження подрібнювача, яке здійснюється для більшості виробництв малої продуктивності в ручному режимі. Запропоновано методику та алгоритм для визначення максимальної енергоефективності системи подрібнення відходів у функції залежності коефіцієнта завантаження електродвигуна подрібнювача при різних значеннях прикладеної напруги. За результатами досліджень пропонується розробити пристрій керування величиною прикладеної напруги при змінних завантаженнях електроприводу, що дозволить зменшити споживання енергії електродвигуном та підвищити його енергоефективність на 4-6 %.

Запропоновану методику можливо також використати при проведенні діагностики електродвигуна подрібнювача, що знаходиться в процесі експлуатації технологічної лінії виробництва пелет.
енергоефективність, біопаливні пелети, електродвигун, подрібнювач твердих рослинних відходів

Постановка проблеми. Біомаса у вигляді твердих рослинних відходів (ТРВ) є одним із найбільш доступних джерел для енергетичного використання в сфері відновлювальної енергетики [1]. Розповсюдженим є застосування біопалива, виготовленого з твердих рослинних відходів, у вигляді пелет та брикетів [1,2].

Технологічний процес виробництва пелет умовно можна розділити на етапи: 1) попередньої підготовки, що включає процеси подрібнення ТРВ, сушіння та кондиціонування; 2) пресування; 3) охолодження, розфасовка і упаковка отриманих пелет.

В залежності від фізико-механічних характеристик ТРВ витрати електроенергії в процесі їх подрібнення можуть складати 40...60 % від загальних витрат електроенергії при виробництві пелет.

Одними із основних виробників пелет з ТРВ, що їх використовують для власних потреб, є невеликі фермерські господарства та малі сільськогосподарські підприємства. В системах подрібнення ТРВ таких виробників спостерігається значна нерівномірність процесу завантаження рослинних відходів в систему і часто вона працює в режимах, які суттєво відрізняються від номінальних, але більшість використовуваних при цьому електроприводів робочих машин не оснащені сучасними засобами з енергозбереження. Внаслідок цього, спостерігається підвищене споживання електричної енергії, через відсутність встановлених засобів регулювання

експлуатаційних режимів роботи електродвигунів при змінному завантаженні робочих машин, що особливо характерно для первинного етапу процесу подрібнення рослинних відходів.

Тому підвищення енергоефективності системи подрібнення твердих рослинних відходів для виробництва біопаливних пелет є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання вивчення втрат активної потужності ΔP в асинхронному електродвигуні (АД) при різних режимах розглядалося в роботі [3], а в системі електродвигун – робоча машина в роботі [4].

Методика визначення енергетичної оцінки режимів роботи електродвигуна розглянута в [5]. У роботі [6] представлено рішення оптимального керування трифазним АД в якому баланс енерговтрат залежить від крутного моменту та режиму завантаження. Енергозберігаючі режими роботи АД при змінному завантаженні були розглянуто в роботі [7]. Результати дослідження електромеханічних і теплових процесів при різних значеннях навантаження АД та живлячої напруги, а також аналіз втрат в цих процесах представлені в роботі [8].

В роботі [9] проведено дослідження енергозбереження та енергоефективності в технологічному процесі післяжнивної обробки зерна з використанням зерноочисних установок. Визначено, що енергоефективність процесу очищення зерна можна оцінити лише тоді, коли всі машини з АД працюють на одній виробничій лінії та узгоджені за продуктивністю.

Аналіз наведених вище робіт показав, що енергоефективність використання АД в процесі його роботи можна визначити через втрати активної енергії, які суттєво залежать від його конструктивного виконання, рівня завантаження та режимів роботи при його експлуатації.

Як було вказано вище, при експлуатації АД подрібнювачів ТРВ в складі маломасштабного виробництва пелет, які в подальшому використовуються в господарствах для власного споживання, спостерігається значна нерівномірність процесу завантаження рослинних відходів в систему і часто вона працює в постійно змінних режимах, що суттєво відрізняються від номінальних.

Проте у згаданих вище дослідженнях не приділено достатньої уваги вивченню питання оптимізації енергоефективності АД при його експлуатації на протязі повного часу роботи згідно технологічного циклу при постійно змінних режимах завантаження та при змінних значеннях величини прикладеної напруги до АД.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження енергоефективності системи подрібнення ТРВ для виробництва біопаливних пелет.

Завданням роботи є визначення оптимальних енергоефективних режимів роботи АД подрібнювача ТРВ в складі маломасштабного виробництва пелет при постійно змінних режимах завантаження та при змінних значеннях величини прикладеної напруги до АД.

Виклад основного матеріалу. Енергоефективність процесу підготовки та подрібнення в значній мірі впливає на подальші технологічні операції та споживання і витрати електричної енергії в загальному процесі виробництва пелет.

Подрібнення рослинних відходів (соломи, лушпиння соняшнику, очерету, стебел камишу, сіна, люцерни тощо) до фракції 5...10 мм здійснюється подрібнювальними та соломорізальними машинами (рис. 1а). Для подрібнення рослинних відходів (соломи, лушпиння, тирси, тощо) до фракції 0,5...1,5 мм перед подачею до преса в лініях гранулювання та брикетування можуть застосовуватись молоткові типи дробарок (рис. 1б), а до рівня 5...10 мкм використовують дезінтегратори (рис. 1в). Загалом продуктивність лінії з виробництва пелет, можна умовно розподілити на

низькопродуктивні до 200 кг/год, середньопродуктивні до 500 кг/год та високопродуктивні понад 500 кг/год.

Інколи в малих господарствах для подрібнення ТРВ застосовують власно виготовлені пристрої, в яких для приводу використовуються АД невеликої потужності.



а) – приклад подрібнювальної машини до фракції 5...10 мм; б) – до фракції 0,5x1,5 мм; в) – до фракції 5x10 мкм

Рисунок 1 – Подрібнювачі рослинних відходів

Джерело: розроблено авторами [1]

Втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні залежать від коефіцієнта завантаження робочої машини κ_z :

$$\kappa_z = \frac{Q}{Q_n}, \quad (1)$$

де Q – фактична продуктивність робочої машини;

Q_n – номінальна продуктивність робочої машини.

Для характеристики енергоефективності електродвигуна системи електроприводу подрібнювача будемо використовувати коефіцієнт корисної дії κ_e , записаний у модифікованому вигляді:

$$\kappa_e = 1 - \kappa_v \frac{P_2}{P_1}, \quad (2)$$

де $\kappa_v = \Delta P / P_2$ – коефіцієнт втрати активної потужності

ΔP – втрати активної потужності в електродвигуні, Вт;

P_2 – активна потужність, яка передається з валу електродвигуна робочій машині, Вт.

P_1 – активна потужність, що споживається первинною обмоткою з мережі, Вт.

Зменшити втрати та підвищити енергоефективність роботи системи подрібнення можна шляхом регулювання завантаження електропривода за величинами струму навантаження або ковзання електродвигуна [3]. Ковзання s при номінальній напрузі електродвигуна залежить від моменту рушання робочої машини m_0 , коефіцієнта його завантаження κ_z та номінального ковзання s_n . Реальне значення ковзання для діючої системи подрібнення можливо встановити тільки експериментальним шляхом в процесі роботи виробництва.

В електричних мережах, що використовуються в системах для енергопостачання об'єктів сільськогосподарського призначення, часто спостерігається нерівномірність значення напруги, яка значним чином впливає на роботу електрообладнання. При зниженні, підвищенні чи несиметрії напруги в мережі від номінального значення, активна потужність на валу асинхронного двигуна практично не змінюється, але це призводить до зміни значень втрати активної потужності та зайвих витрат електричної енергії.

Визначити втрати активної потужності ΔP при заданому κ_3 робочої машини можна на основі рівняння кругової діаграми комплексу повної потужності у функції ковзання при різних заданих кратностях прикладеної напруги до номінальної електродвигуна κ_U .

На рисунку 2 приведені розраховані в якості прикладу значення залежності ΔP в електродвигуні подрібнювача для електродвигуна серії АІР номінальною потужністю 4 кВт від κ_3 при різних значеннях κ_U , а на рисунку 3 показані залежності κ_6 від κ_3 електродвигуна робочої машини також при різних значеннях κ_U , вигляд яких аналогічний отриманим у роботі [8].

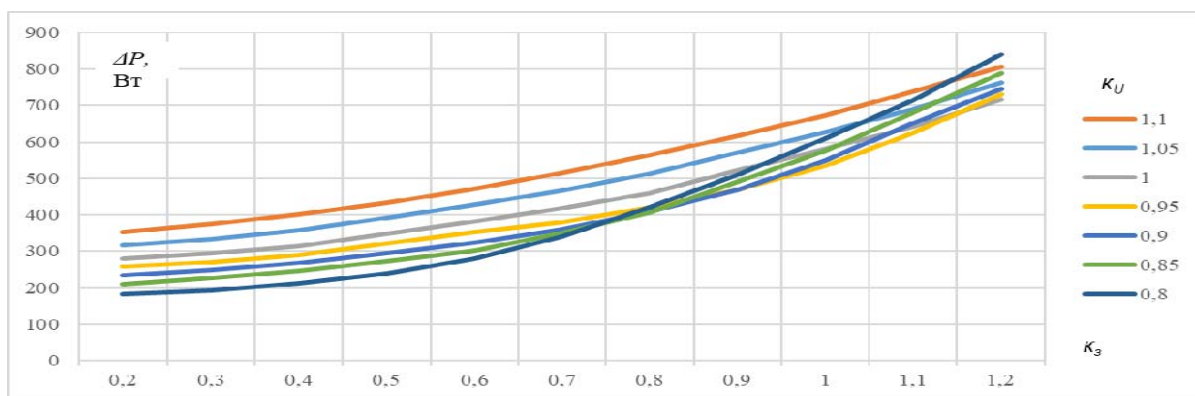


Рисунок 2 – Залежність ΔP в асинхронному електродвигуні у функції коефіцієнта κ_3 робочої машини при різних значеннях коефіцієнта прикладеної напруги κ_U

Джерело: розроблено авторами

Аналіз залежностей на рисунку 2 показує, що при певних значеннях κ_3 робочої машини та вибраній величині напруги, існують області, в яких ΔP менше, ніж при номінальній напрузі.

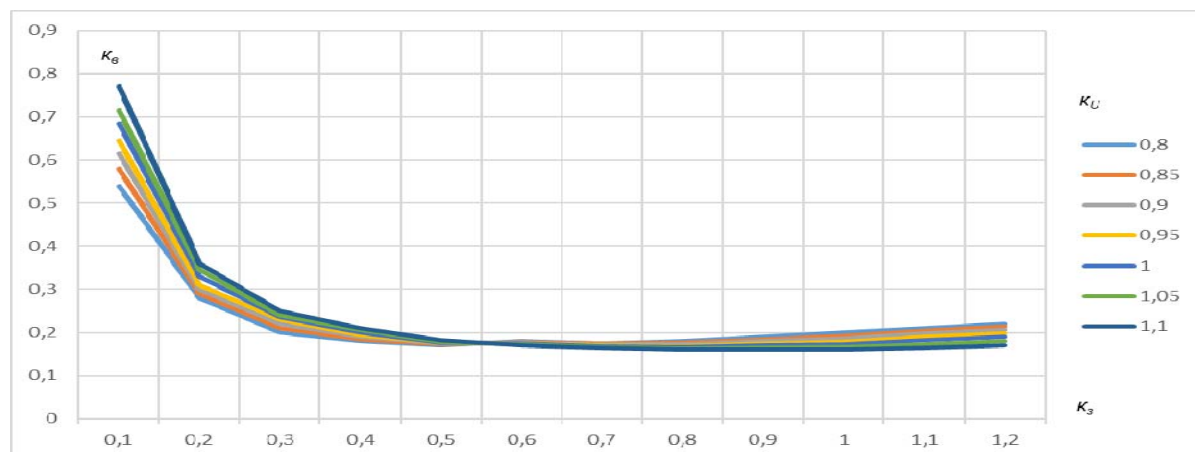


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта втрат κ_6 в електродвигуні у функції коефіцієнта κ_3 робочої машини при різних значеннях коефіцієнта прикладеної напруги κ_U

Джерело: розроблено авторами

З графіків, наведених на рисунку 3 видно, якщо κ_3 знаходиться в межах від 0,1 до 0,5 то відбувається зменшення значення κ_6 , при зростанні κ_3 від 0,5 до 0,7 коефіцієнт κ_6 досягає своїх мінімальних значень при умові, що напруга близька до номінальної і збільшені κ_3 від 0,7 до 1,1 κ_6 буде збільшуватися при зменшені подачі напруги на електродвигун.

Для визначення енергоефективного режиму роботи електродвигуна системи подрібнення твердих рослинних відходів у виробництві біопаливних пелет пропонується методика та наступний алгоритм її використання:

1. Вимірюється для встановленого електродвигуна значення ковзання s .
2. Розраховується κ_3 електродвигуна для даної робочої машини:

$$\kappa_3 = \frac{\left(\frac{1-s}{s_H} - m_0\right)s + m_0 s_H}{1-s}, \quad (3)$$

3. Розраховується s електродвигуна при розрахованому значенні κ_3 та при заданих значеннях напруги U_U :

$$s = \frac{k_3 - m_0 s_H}{\frac{1-s_H}{s_H} k_U^2 + k_3 - m_0}, \quad (4)$$

4. Розраховуються загальні втрати ΔP при різних значеннях U_U :

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m = k_U^2 \Delta P_{c.H} + 3(R_1' + R_2'') \cdot \left(\frac{k_U^2 U_H^2}{\left(R_1' + \frac{R_2''}{s}\right)^2 + (X_1' + X_2'')^2} \right), \quad (5)$$

де ΔP_c – втрати активної потужності в намагнічуючому контурі електродвигуна;
 ΔP_m – втрати активної потужності в обмотках електродвигуна;
 R_1', R_2'', X_1', X_2'' – параметри схеми заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна, Ом;

5. Знаходимо значення κ_e при якому вони будуть максимальними, рис. 5.

$$\kappa_e \rightarrow \kappa_{e,max}. \quad (6)$$

Вищенаведений алгоритм використовувався для визначення енергоефективності електроприводу подрібнювача потужністю 4 кВт, за графіком його завантаження на протязі восьмигодинної робочої зміни, наданим фермерським господарством.

Залежність κ_e з врахуванням κ_3 за період восьмигодинної робочої зміни та при різних значеннях U_U зображено на рисунку 4.

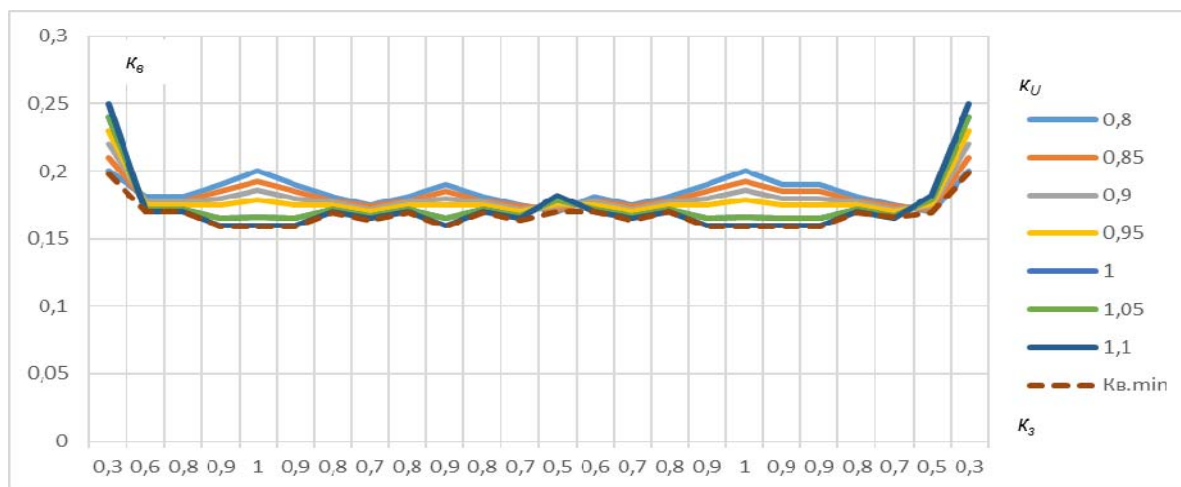


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта втрат κ_e від коефіцієнта κ_3 з врахуванням коефіцієнта прикладеної напруги U_U .

Джерело: розроблено авторами

Аналіз графіків наведених на рисунок 4 показує, що при κ_3 до 0,7 відбувається зменшення значення κ_e , а при κ_3 більше 0,7 буде збільшуватися κ_e при зменшенні подачі напруги на електродвигун.

Залежність κ_e з врахуванням κ_3 за період восьмигодинної робочої зміни та при різних значеннях κ_U зображено на рисунку 5.

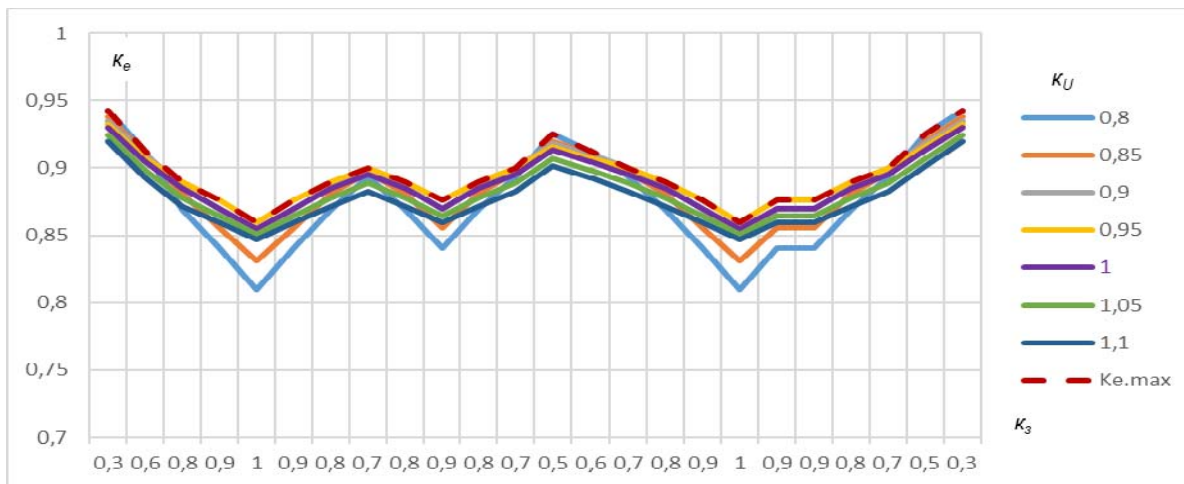


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта енергоефективності κ_e від коефіцієнта завантаження κ_3 при різних коефіцієнтах прикладеної напруги κ_U

Джерело: розроблено авторами

Енергоефективність подрібнювача буде збільшуватися коли в недовантажених режимах роботи електродвигуна при значеннях κ_3 до 0,7 подавати κ_U менше номінального значення та буде зменшуватися при збільшенні значення κ_3 від 0,7 при значеннях κ_U відмінних від номінального.

Запропонована методика дозволяє визначати κ_e та κ_e в асинхронному електродвигуні подрібнювача у функції κ_3 та рівня κ_U . Аналіз отриманих графіків залежності κ_e показує, що вона носить нелінійний характер і, її використання дозволяє забезпечити енергоефективний режим роботи електродвигуна шляхом визначення оптимального рівня κ_U при змінному κ_3 .

На основі запропонованого підходу пропонується розробити та впровадити пристрій для підвищення енергоефективності системи приводу подрібнювача рослинних відходів шляхом підтримання оптимальних значень прикладеної напруги до електродвигуна при змінному режимі завантаження подрібнювача.

Очікується, що при його впровадженні зменшиться споживання електричної енергії приводом подрібнювача, а енергоефективність підвищиться на 4-6 %. Дану методику можливо також використати при проведенні діагностики електродвигуна подрібнювача, що знаходиться в процесі експлуатації технологічної лінії виробництва пелет.

Висновки.

1. Запропоновано методика та алгоритм визначення енергоефективності системи подрібнення твердих рослинних відходів для виробництва біопаливних пелет. На їх основі можна визначати області мінімальних значень κ_e та максимальних κ_e у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна робочої машини при різних значеннях прикладеної напруги.

2. Досліджено енергоефективність АД типу АИР номінальною потужністю 4 кВт подрібнювача ТРВ при його роботі за графіком завантаження на протязі

восьмигодинної робочої зміни, наданим фермерським господарством. Визначено, що при значеннях κ_3 в межах від 0,1 до 0,5 відбувається зменшення значення κ_6 при зниженні κ_U , при значеннях κ_3 від 0,5 до 0,7 коефіцієнт кв за номінальної напруги досягає своїх мінімальних значень та при зростанні κ_3 від 0,7 до 1,0 κ_6 буде збільшуватися при зменшенні подачі напруги на електродвигун.

3. Аналіз результатів проведених досліджень показав, що при $\kappa_3 < 0,7$ та $\kappa_U < \kappa_{U_{ном}}$ енергоефективність подрібнювача буде збільшуватися. При цьому спостерігається деяке зниження енергоефективності при значеннях $\kappa_3 > 0,7$ та $\kappa_U \neq \kappa_{U_{ном}}$.

4. За результатами досліджень пропонується розробити пристрій керування величиною прикладеної напруги при змінних завантаженнях впровадження якого, дозволить зменшити споживання енергії приводом подрібнювача та підвищити енергоефективність на 4-6 %.

Список літератури

1. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів: монографія / Клименко В. В., Кравченко В. І., Боков В. М., Гуцул В. І. ; за ред. В.В. Клименка. Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. 162 с.
2. Recent developments in biomass pelletization - A review / Stelte, W., Sanadi, A.R., Shang, L., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J., and Henriksen, U.B. *BioRes.* 2012, 7(3), P.4451-4490. <https://bioresources.Cnr.ncsu.edu/resources/recent-developments-in-biomass-pelletization-a-review/>.
3. Овчаров С. В., Стребков А. А. Исследование потерь активной энергии в асинхронном электродвигателе в эксплуатационных условиях. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2015. Т. 2, № 8 (74). С. 22-28.
4. Постникова М.В., Телюта Р.В. Исследование потерь активной мощности в системе «электродвигатель – рабочая машина». *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.* 2011. Вип. 11, т.3. С.165-172.
5. Овчаров С. В., Стребков А. А. Разработка методики энергетической оценки эксплуатационных режимов работы силового электрооборудования. *Технологический аудит и резервы производства.* 2015. 3 (1). С. 21-26.
6. Optimization of Electric Energy in Three-Phase Induction Motor by Balancing of Torque and Flux Dependent Losses / N. T. Hung [et al.]. *Lecture Notes in Electrical Engineering.* 2014. P. 497-507.
7. Телюта А. В., Телюта Р. В., Каліч В. М. Енергозберігаючий режим роботи асинхронного електродвигуна. *Новітні технології в агроінженерії: проблеми та перспективи впровадження (присвячена 55-й річниці заснування інженерно-технологічного факультету Полтавського державного аграрного університету)* : матеріали I Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., 1-2 червня 2021 р. Полтава. ПДАУ, 2021. С. 22-25.
8. Енергозберігаючі режими роботи асинхронних електродвигунів при змінному завантаженні. / С.О. Квітка, О.Ю. Вовк, О.А. Стребков, А.А. Волошина. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки.* 2019. Вип. 19, т. 3. С. 142-150.
9. Improving Energy Efficiency of Grain Cleaning Technology / Bazaluk, O., Postnikova, M., Halko, S., Mikhailov, E., Kovalov, O., Suprun, O., Nitsenko, V. *Applied Sciences*, 12 (10), 5190. P.1-12. <https://doi.org/10.3390/app12105190>.

References

1. Klymenko, V.V., Kravchenko, V.I., Bokov, V.I. & Hutsul, V.I. (2017). *Tekhnolohichni osnovy vyhotovlennia biopalyva z roslinnykh vidkhodiv ta yikh kompozytiv* [Technological bases of biofuel production from vegetable waste and their composites]. Kropyvnytskyi: PE "Exclusive-System" [in Ukrainian].
2. Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2012). Recent developments in biomass pelletization - A review, *BioRes*, 7(3), pp.4451-4490. Retrieved from <https://bioresources.Cnr.ncsu.edu/resources/recent-developments-in-biomass-pelletization-a-review/>.
3. Ovcharov, S.V. & Strebkov, A.A. (2017). Issledovaniye poter aktivnoy energii v asinkhronnom elektrodvigatеле v ekspluatatsionnykh usloviyakh [Study of active energy losses in an asynchronous electric motor under operating conditions]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy.* – *East European Journal of Advanced Technologies*, 2, 8 (84), 22-28 [in Ukrainian].

4. Postnikova, M.V. & Teliuta, R.V. (2011). Issledovanie poter aktivnoj moshhnosti v sisteme «jelektrodivigatel – rabochaya mashina» elektrodivigatele [Study of active power losses in the electric motor-working machine system]. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnologichnoho universytetu. – Practice of the Taurian State Agrotechnological University, Vol. 11, 3*, 165-172 [in Ukrainian].
5. Ovcharov, S.V. & Strebkov, A.A. (2015). Razrabotka metodiki energeticheskoy otsenki ekspluatatsionnykh rezhimov raboty silovogo elektrooborudovaniya [Development of a methodology for energy assessment of operating modes of power electrical equipment]. *Tekhnologicheskij audit i rezervy proizvodstva – Technological audit and production reserves, 3 (1)*, 21-26 [in Ukrainian].
6. Hung, N.T. et al. (2014). Energy in Three-Phase Induction Motor by Balancing of Torque and Flux Dependent Losses. Lecture Notes in Electrical Engineering, pp. 497-507 [in English].
7. Teliuta, A.V., Teliuta, R.V. & Kalich, V.M. (2021). Enerhozberihaiuchy rezhym roboty asynkronnoho elektrodivyhuna [Energy saving mode of operation of asynchronous electric motor]. New technologies in agroengineering: problems and prospects of implementation (dedicated to the 55th anniversary of the founding of the Faculty of Engineering and Technology of Poltava State Agrarian University): I Vseukr. nauk.-prakt. internet-konf., (1-2 chervnia 2021 r.) – I All-Ukrainian. Scientific&Practical Internet conference (pp. 289-291). Poltava. PSAU [in Ukrainian].
8. Kvitka, S.O., Vovk, O. Yu., Strebkov, A.A. & Voloshyna, A.A. (2019). Enerhozberihaiuchy rezhymy roboty asynkronnykh elektrodivyhuniv pry zminnomu zavantazhenni [Energy saving modes of operation of asynchronous electric motors at variable loading]. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnologichnoho universytetu – Practice of the Taurian State Agrotechnological University, Vol. 19, 3*, 142-150 [in Ukrainian].
9. Bazaluk, O., Postnikova, M., Halko, S., Mikhailov, E., Kovalov, O., Suprun, O. & Nitsenko, V. (2022). Improving Energy Efficiency of Grain Cleaning Technology. *Applied Sciences, 12 (10)*, 5190. pp.1-12. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/app12105190> [in English].

Ruslan Teliuta, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Klymenko**, Prof., DSc., **Oleksandr Skrypnyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Anna Teliuta, Lecturer

Kropyvnytskyi Agricultural Vocational College, Kropyvnytskyi, Ukraine

Energy Efficiency of Solid Vegetable Waste Shredding System for Biofuel Pellets Production

The production of biofuel pellets requires significant energy consumption during their production. At the primary technological stage of production: grinding of solid vegetable waste (SVW), electricity costs can be, depending on the physical and mechanical characteristics of SVW, 40... 60% of the total electricity consumed for the production of pellets. Significant losses of electric energy are observed during grinding due to uneven loading of the shredder and operation of the electric motor of its drive in constantly changing modes. This is especially true for small productions when downloading is done manually. This paper proposes a method and algorithm for determining the maximum values of the energy efficiency of the SRW grinding system for the production of biofuel pellets as a function of the load factor of the electric motor of the working machine at different values of applied voltage.

As a result of research of an asynchronous electric motor with a nominal power of 4 kW SVW shredder during its operation according to the loading schedule during the eight-hour work shift provided by the farm, it was determined that control of applied voltage at variable loads will reduce energy consumption and increase the energy efficiency of the shredder by 4...6%. According to the results of research, it is proposed to develop a device for controlling the magnitude of the applied voltage at variable loads, the implementation of which will reduce energy consumption by the shredder drive.

The proposed technique can also be used in the diagnosis of the electric motor of the shredder, which is in the process of operation of the technological line of production of pellets.

energy efficiency, biofuel pellets, electric motor, solid vegetable waste shredder

Одержано (Received) 10.05.2022

Прорецензовано (Reviewed) 23.05.2022

Прийнято до друку (Approved) 26.09.2022