

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМ ДОЗАТОРОМ РОЗЧИНУ ВАПНА ДО СОЛОМИ ПШЕНИЦІ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ НА МОБІЛЬНИХ КОМБАЙНАХ ПЕЛЛЕТ ДЛЯ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор

В. М. Поліщук, доктор технічних наук, професор

В. О. Мірошник, кандидат технічних наук, доцент

О.О. Опришко, кандидат технічних наук, доцент

І. Т. Цигульов, кандидат технічних наук, доцент

Т. С. Давиденко, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: sosdok@nubip.edu.ua

Анотація. *Об'єктом дослідження є приводний електродвигун автономного дозатора розчину вапна до соломи пшениці при виготовленні пеллет для біогазових установок. Метою роботи є визначення оптимального закону керування приводним електродвигуном автономного дозатора розчину вапна до соломи пшениці при виготовленні на мобільних комбайнах пеллет для біогазових установок. Для досягнення поставленої мети вирішувались такі завдання: здійснено обґрунтування технології виготовлення пеллет для біогазових установок з використанням мобільних комбайнів; розроблена модель функціонування приводним електродвигуном автономного дозатора розчину вапна до соломи пшениці. За допомогою запропонованої моделі забезпечується визначення оптимальних режимів керування приводним електродвигуном автономного дозатора розчину вапна до соломи пшениці при мінімальних затратах потужності на теплові втрати і на переборення в'язкого тертя в процесі дозування розчину вапна. Найбільш важливий результат дослідження полягає в обґрунтуванні технології виготовлення пеллет на обладнанні самохідного комбайна Metitron 560 з використанням спеціального дозатора розчину вапна до екструдованої соломи, що забезпечує найбільшу швидкість виходу метану. Значимість результатів дослідження полягає в тому, що використання пеллет екструдованої соломи та вапна дозволяє збільшити швидкість виходу метану більш ніж на 60 % порівняно зі зброджуванням необробленої соломи. Автономний енергоефективний дозатор доцільно використовувати на комбайні Metitron 560, який здатний безпосередньо на полі виготовляти з соломи різних культур гранули розміром від 6 до 12 мм з додаванням розчину вапна для збільшення виходу біогазу. Перевага використання гранул з екструдованої соломи пшениці полягає також у тому, що таку сировину краще транспортувати та зберігати на складах, що необхідно для безперервної роботи біогазових установок, оскільки сільськогосподарські відходи є сезонними.*

Ключові слова: *оптимальне керування, автономний дозатор, розчин вапна, солома, пеллети для біогазових установок*

Актуальність. Серед альтернативних джерел енергії все більшого значення набуває отримання біогазу з відходів, до яких належать гній, солома, стебла тощо. Оскільки солома має міцний лігніноцелюлозний комплекс, вона важко зброджується в біогазових установках. Тому для підвищення виходу біогазу з гною ВРХ та соломи існує актуальне завдання їх утилізації з мінімальними витратами, покращуючи при цьому екологію. Одним із ефективних способів утилізації лігніноцелюлозних матеріалів є екструзійна їх обробка з додаванням гашеного вапна за допомогою спеціальних дозаторів, розроблення яких потребує проведення додаткових досліджень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Утилізація сільськогосподарських відходів у біогазових реакторах є одним з екологічно ефективних рішень для виробництва енергії у вигляді біогазу та отримання високоякісних добрив [1–2]. У роботах [3–4] запропонована лужна попередня обробка лігніноцелюлозних матеріалів на основі додавання до субстрату розчину вапна, що забезпечує збільшення виходу біогазу при порівняно низькій вартості матеріалу. Однак, у вище перерахованих публікаціях недостатньо повно розроблені технологічні основи оптимального додавання за допомогою спеціальних дозаторів розчину вапна до соломи пшениці при виготовленні пеллет для біогазових установок (БГУ) безпосередньо на мобільних комбайнах.

Мета роботи – визначення оптимального закону керування приводним електродвигуном автономного дозатора розчину вапна до соломи пшениці при виготовленні на мобільних комбайнах пеллет для БГУ.

Матеріали та методи дослідження. Для досягнення зазначеної мети виникає необхідність у вирішенні таких завдань: обґрунтувати технологію виготовлення пеллет на мобільних комбайнах для біогазових установок; розробити модель керування приводним електродвигуном автономного дозатора розчину вапна до соломи пшениці.

Як показують результати експериментальних досліджень використання екструдованої спільно з вапном соломи як косубстрату дозволяє збільшити вихід біогазу та електроенергії більш ніж на 60 % порівняно зі зброджуванням необробленої соломи, та на 30-50 % порівняно зі зброджуванням коров'ячого гною [5-6]. Для отримання гранул/брикетів найбільш ефективною та перспективною є «пеллетна» технологія збирання соломи, яка передбачає її подрібнення (екструзію) та змішування з іншими домішками в процесі пеллетування з метою підвищення ефективності її зберігання і використання в БГУ.

Найбільш поширеними закордонними технологіями пеллетування соломи є пересувні міні-заводи повного циклу, які здатні виробляти пеллети прямо в місцях збору сировини, наприклад, мобільний заготівельник пеллет Premos 5000, що розроблений компанією Krone [6].

Premos 5000 можна використовувати і як стаціонарну установку. Ємність бункера машини становить 5 т. Продуктивність – 5 т/год. У полі працює від двигуна трактора, в стаціонарних умовах також може живитися і від електродвигуна.

Пізніше схожу машину вивела на ринок і австрійська компанія Schaidner – рухомий заготівельник Pelletec D8.0, здатний виробляти пеллети з соломи, сіна, залишків інших сільськогосподарських культур з продуктивністю до 8 т / год.

Спереду на комбайн навішується косарка, яка подає зелену масу в корпус. Матеріал піддається попередньому нагріванню (до 70° C) і при необхідності регулюється його вологість. Потім органічна маса пресується і охолоджується.

Ще далі в пеллетному комбайнобудуванні просунулася компанія CSP Laser. Сکوоперувавшись з відомої в аграрному бізнесі фірмою Claas, німецькі інженери створили самохідний комбайн Metitron 560 [6].

Metitron 560 здатний безпосередньо на полі виготовляти з соломи різних культур гранули розміром від 6 до 12 мм. Прес для гранулювання приводиться в рух двигуном комбайна потужністю 615 к.с. і може видавати до 6 т продукції на годину. Для виготовлення гранул з різних сировинних матеріалів у цих самохідних комбайнів мінливий гідростатичний привід на всіх чотирьох колесах забезпечує їзду комбайнів на нерівній місцевості. Крім того, технологія збирання енергетичних

культур, що реалізована в цих комбайнах, передбачає застосування прямого різача для злаків та люцерни, що дозволяє забезпечити збирання всього асортименту сировини для БГУ, включаючи залишки кукурудзяного бісквіту (*Miscanthus*). Машина перерізає сировину до потрібної довжини і вдвічі зменшує структуру матеріалу, який буде гранульований. Для виробництва високоякісних гранул використовується ціла система попереднього подрібнення, що адаптується під час експлуатації до всіх енергетичних культур. При цьому передбачено: автоматичне регулювання подачі матеріалу, прямий привід з дизеля через зубчастий ремінь до прес-гранулятора, транспортування гранулів та після пеллетного преса – їх охолодження. Розмір гранулята регулюється від 6 до 12 мм (стандартний розмір 8 мм).

Головна відмінна риса Metitron 560 полягає в її мобільності та автономності. По суті, це звичайний комбайн, в корпус якого «вбудована» фабрика по виробництву гранульованих пеллет.

Така конструкція самохідного комбайна має цілу низку переваг, оскільки відсутня необхідність використовувати додаткову техніку для транспортування обладнання на поле як це було у попередніх моделей. Ще більше схожості із звичайним комбайном додає ще й той факт, що готовий гранулят передається з резервуара на рухому поруч техніку через спеціальний шнек – це традиційне рішення при зборі комбайнами зернових культур. Потім гранулят перевозиться на склади зберігання, або безпосередньо на підприємства для їх використання.

На рис. 1 показано зовнішній вигляд комбайна типу Metitron при збиранні соломи.

Однак, розробниками не передбачено дозатора розчину вапна для виготовлення спеціальних пеллет з метою підвищення виходу біогазу на БГУ. Одним з напрямів вирішення цього питання – це розроблення автономного енергоефективного дозатора вапна на базі приводного електродвигуна постійного струму, який без суттєвих доробок може бути вмонтований у верхню частину корпусу комбайна Метитрон біля додаткового резервуара з розчином вапна.



Рис. 1. Скошування, збирання та гранулювання соломи за допомогою комбайну Metitron

У математичній моделі керування приводним електродвигуном автономного дозатора розчину вапна до соломи пшениці механічний рух електричного привода з двигуном постійного струму незалежного збудження описується рівнянням руху електропривода:

$$M_d - M_o = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

де момент опору навантаження в'язкого тертя в процесі дозування розчину вапна визначається рівнянням:

$$M_o = k_1 \cdot \omega, \quad (2)$$

де ω – кутова швидкість електродвигуна, рад/с; J – момент ротора електродвигуна, кг·м²; k_1 – коефіцієнт пропорційності опору, Н·м/с [7].

Електродвигун працює в режимі, коли падіння напруги $U_1 = I \cdot R_d$ значно більше оберненої величини електрорушійної сили $E = C_e \cdot \omega$.

Момент електродвигуна визначається за формулою:

$$M_d = C_m \cdot I_d, \quad (3)$$

де I_d – струм на електродвигуні, А; R_d – опір електродвигуна, $R_d = R_r + R_s$ – сумарний опір ротора і статора, Ом; C_e – коефіцієнт пропорційності за ЕРС, В/рад; C_m – коефіцієнт пропорційності моменту електродвигуна, Н·м/А.

При вирішенні задачі впливом індуктивності в ланці ротора нехтуємо.

Відповідно до закону Кірхгофа функція керування (керована напруга) дорівнює:

$$U_y = I_d \cdot R_d + C_e \cdot \omega. \quad (4)$$

З рівняння (4) знаходимо: $I_d = \frac{U_y - C_e \cdot \omega}{R_d}$ і підставивши цей вираз у рівняння (1) отримаємо:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{U_y}{R_d} C_m - \left(\frac{C_e \cdot C_m}{R_d} + k_1 \right) \omega. \quad (5)$$

Першу складову в дужках рахувати не будемо, тому що $\frac{C_e \cdot C_m}{R_d} \ll k_1$.

Спростимо рівняння динаміки обертів двигуна (5) до виду:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{C_m}{R_d} U_y - k_1 \omega. \quad (6)$$

Перетворимо диференціальне рівняння і приведемо його до виду Коші, ввівши коефіцієнти $b = -k_1/J$ і $m = C_m/(R_d J)$, тоді

$$\frac{d\omega}{dt} = b \cdot \omega + m \cdot U_y. \quad (7)$$

Необхідно визначити залежності керуючої дії U_y від обертів двигуна при мінімальних затратах потужності на теплові втрати і на переборення в'язкого тертя при дозуванні розчину вапна (рис. 2). При цьому слід врахувати, що двигун працює в режимі, коли $C_e \cdot \omega \ll I_d \cdot R_d$ і тоді струм двигуна буде визначатися:

$$I_d = \frac{U_d}{R_d}. \quad (8)$$

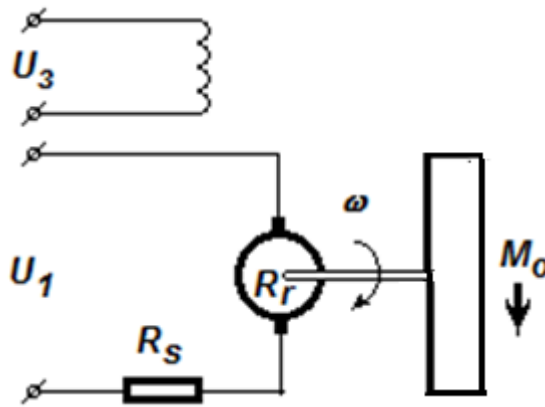


Рис. 2. Схема електричного привода з двигуном постійного струму автономного дозатора

Потужність втрат струму на тепло складе:

$$P_e = I_d \cdot U_y = \frac{U_y^2}{R_d}. \quad (9)$$

Потужність втрат струму на переборення в'язкого тертя складе:

$$P_t = M_o \cdot \omega = k_1 \cdot \omega^2. \quad (10)$$

Завданням роботи системи оптимального керування приводним двигуном постійного струму автономного дозатора є мінімізація сумарної енергії втрат, яка представлена у вигляді функціонала:

$$I = \int_0^\infty (a_1 \cdot \omega^2 + a_0 \cdot U_y^2) dt, \quad (11)$$

де коефіцієнти $a_1 = t_1$, Дж/с, а $a_0 = 1/R_d$, Вт/В².

Задачу визначення оптимального керування, що забезпечує мінімум інтегрального рівняння (11), розв'язуємо методом динамічного програмування.

Для системи, що розглядається, рівняння динамічного програмування матимуть вигляд:

$$\begin{cases} a_1 \cdot \omega^2 + a_0 \cdot U_y^2 + (b \cdot \omega + m \cdot U_y) \cdot \frac{d\Psi}{d\omega} = 0; \\ 2 \cdot a_0 \cdot U_y + m \cdot \frac{d\Psi}{d\omega} = 0, \end{cases} \quad (12)$$

де Ψ – допоміжна функція, яка визначається рівнянням:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -V, \quad (13)$$

в якій V – підінтегральна функція функціоналу, що мінімізується. Розв'яжемо друге рівняння системи (12) і знайдемо:

$$\frac{d\Psi}{d\omega} = -\frac{2 \cdot a_0}{m} \cdot U_y. \quad (14)$$

Після підстановки значення $\frac{d\Psi}{d\omega}$ в перше рівняння (12) отримаємо рівняння відносно керуючої дії U_y .

$$m \cdot a_0 \cdot U_y^2 + 2 \cdot a_0 \cdot b \cdot \omega \cdot U_y - a_1 \cdot m \cdot \omega^2 = 0. \quad (15)$$

Розв'язок рівняння має вигляд:

$$U_y = -k \cdot \omega, \quad (16)$$

де k дорівнює:

$$k = -\frac{b}{m} + \sqrt{\left(\frac{b}{m}\right)^2 + \frac{a_1}{a_0}}. \quad (17)$$

На основі рівняння (16) будемо функцію оптимального керування за мінімальними втратами енергії [7].

Слід зауважити, що враховуючи припущення про режим роботи електродвигуна $C_e \cdot \omega \ll I_d \cdot R_d$, отриманий закон справедливий для таких значень обертів двигуна, при яких $\omega \ll \frac{U_y}{C_e}$.

Результати досліджень та їх обговорення. Розрахунки для визначення оптимального закону керування електродвигуном здійснювались з використанням програми MathCad за такою методикою:

1. Введення в MathCad вихідних даних: J – момент ротора електродвигуна, кг·м²; C_e – коефіцієнт пропорційності за ЕРС., В/с; C_m – коефіцієнт пропорційності моменту електродвигуна, Н·м/А, k_1 – коефіцієнт пропорційності опору, Н·м/с; R_d – сумарний опір ротора і статора, Ом;

$$J := 1.96 \cdot 10^{-5} \quad C_e := 0.096 \quad C_m := 2.94 \cdot 10^{-3}$$

$$k_1 := 0.981 \cdot 10^{-3} \quad R_d := 5$$

2. Визначення коефіцієнтів спрощеного диференціального рівняння руху електродвигуна (11).

$$b := \frac{-k_1}{J} \quad b = -50.051 \quad m := \frac{C_m}{R_d \cdot J} \quad m = 30$$

3. Визначення коефіцієнтів інтегрального рівняння (12) функціонала:

$$a_0 := \frac{1}{R_d} \quad a_0 = 0.2 \quad a_1 := k_1 \quad a_1 = 9.81 \times 10^{-4}$$

4. Знаходження коренів квадратного рівняння керуючої дії U_y :

$$k := -\frac{b}{m} + \sqrt{\left(\frac{b}{m}\right)^2 + \frac{a_1}{a_0}} \quad k = 3.338$$

5. Визначення залежності оптимального значення керуючої дії від обертів електродвигуна при односторонній його роботі.

$$\omega := 0, 1 \dots 100 \quad U_y(\omega) := -k \cdot \omega$$

6. Побудова графіка функції оптимального керування електродвигуном дозатора при мінімальних втратах електричної енергії (рис. 3).

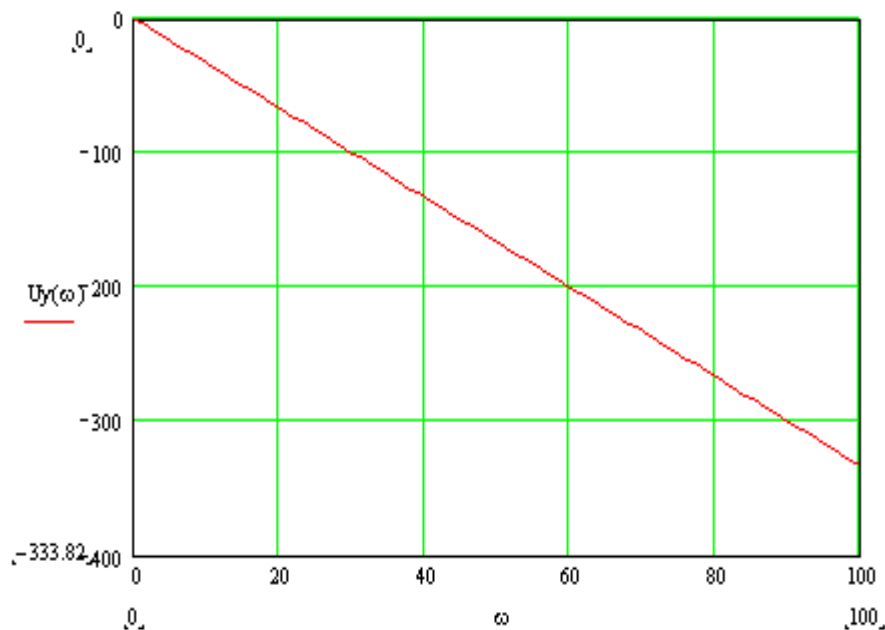


Рис. 3. Графік функції оптимального керування

Висновки і перспективи. Оптимальний закон керування, при якому забезпечуються мінімальні втрати електричної енергії на електродвигуні, є лінійним. Оберти двигуна повинні бути невеликими, враховуючи, що $\omega \ll \frac{U_y}{C_e} \ll 10U_y$.

Витрати сировини, що подається для виготовлення пеллет на екструзію, можуть змінюватися в процесі скошування сировини, тому і продуктивність дозатора розчину вапна (оберти двигуна) також повинна змінюватись у процесі виготовлення пеллет. При цьому для мінімізації витрат електричної енергії оберти двигуна повинні бути мінімальними але такими, які забезпечують необхідну кількість подачі вапна дозатором відповідно до технологічного регламенту.

Значимість результатів досліджень полягає в тому, що використання екструдованої спільно з вапном соломи як косубстрату дозволить збільшити вихід біогазу та електроенергії більш ніж на 60 % порівняно зі зброджуванням необробленої соломи, та на 30-50 % порівняно зі зброджуванням коров'ячого гною.

При зброджуванні гранул із вапном, виготовлених із соломи, зібраної з площі 10 тис. га, період окупності біогазового комплексу становитиме 6,7 років, що нижче за період окупності біогазового комплексу, який працює лише на екструдованій соломі (8,2 роки) або тільки на подрібненій соломі (11,2 роки).

Список використаних джерел

1. Marks S., Dach J., Fernandez Morales F. J., Mazurkiewicz J., Pochwatka P., Gierz Ł. (2020). New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. *Journal of Ecological Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 19-25.
2. Janczak D., Mazurkiewicz J., Czekala W., Myszyra M., Kozłowski K., Jezowska A. (2019). A Possibility of Functioning Biogas Plant at a Poultry Farm. *Journal of Ecological Engineering*, Vol. 20, No. 11, pp. 225-231.
3. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Рудська В.О. (2018). Експериментальне дослідження показників виходу біогазу в процесі періодичного метанового бродіння соломи. *Відновлювана енергетика*, №2, с. 88-97.
4. Фльонц І.В., Підховна С.М., Голяш Н.М. (2014). Попередня обробка екструдованої соломи пшениці розчином $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з метою підвищення виходу біогазу. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України: [зб. наук. пр.]*, Вип. 194, ч. 1, с. 236-242. – (Серія «Техніка та енергетика АПК»).
5. Polishchuk V.M., Shvorov S.A., Flonts I.V., Davidenko T.S., Dvornyk Ye.O. (2021). Increasing the Yield of Biogas and Electricity During Manure Fermentation Cattle

by Adding Extruded Wheat Straw and Lime. Problemele energeticii regionale, 1 (47), pp. 111-124.

6. Zablodskiy M., Klendiy P., Shvorov S., Dudar O. (2022) Methods and means of increasing the efficiency of biogas plants : Monograph – LAP LAMBERT Academic Publishing, 200 p.

7. Лисенко В.П., Шворов С.А. (2012). Моделювання та оптимізація систем керування. Наук. світ, 2012, 133 с.

References

1. Marks, S., Dach, J., Fernandez Morales, F. J., Mazurkiewicz, J., Pochwatka, P., Gierz, Ł. (2020). New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. Journal of Ecological Engineering, 21 (4), 19-25.

2. Janczak, D., Mazurkiewicz, J., Czekala, W., Myszura, M., Kozłowski, K., Jeżowska, A. (2019). A Possibility of Functioning Biogas Plant at a Poultry Farm. Journal of Ecological Engineering, 20 (11), 225-231.

3. Kucheruk, P.P., Matveev, Yu.B., Rudska, V.O. (2018). Eksperymentalne doslidzhennia pokaznykiv vykhodu biohazu v protsesi periodychnoho metanovoho brodinnia solomy [Experimental study of biogas output indicators in the process of periodic methane fermentation of straw]. Renewable energy, 2, 88-97.

4. Flyonts, I.V., Pidkhovna, S.M., Golyash, N.M. (2014). Poperednia obrobka ekstrudovanoi solomy pshenytsi rozchynom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ z metoiu pidvyshchennia vykhodu biohazu [Preliminary treatment of extruded wheat straw with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution in order to increase biogas yield]. Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine: [Coll. of science pr.], 194 (1), 236-242. – (Technology and Energy of the Agricultural Industry Series).

5. Polishchuk, V.M., Shvorov, S.A., Flonts, I.V., Davidenko, T.S., Dvornyk, Ye.O. (2021). Increasing the Yield of Biogas and Electricity During Manure Fermentation Cattle by Adding Extruded Wheat Straw and Lime. Problemele energeticii regionale, 1 (47), 111-124.

6. Zablodskiy, M., Klendiy, P., Shvorov, S., Dudar, O. (2022). Methods and means of increasing the efficiency of biogas plants : Monograph – LAP LAMBERT Academic Publishing, 200.

7. Lysenko, V.P., Shvorov, S.A. (2012). Modeliuvannia ta optymizatsiia system keruvannia [Modeling and optimization of control systems]. Science world, 2012, 133.

OPTIMAL CONTROL OF AN AUTONOMOUS LIME SOLUTION DISPENSER TO WHEAT STRAW WHEN MANUFACTURED ON MOBILE COMBINED PELLETS FOR BIOGAS PLANTS

S. Shvorov, V. Miroshnyk, O. Opryshko, I. Tsygulyov, T. Davidenko

Abstract. *The object of the study is the drive electric motor of the autonomous lime solution dispenser for wheat straw when making pellets for biogas plants. The purpose of the work is to determine the optimal control law of the drive electric motor of the autonomous dispenser of lime solution to wheat straw when pellets for biogas plants are produced on mobile harvesters. To achieve the goal, the following tasks were solved: the*

substantiation of the pellet production technology for biogas plants using mobile harvesters was carried out; a model of functioning of the drive electric motor of an autonomous dispenser of lime solution for wheat straw was developed. With the help of the proposed model, it is possible to determine the optimal control modes of the drive electric motor of the autonomous lime solution dispenser for wheat straw with minimal power consumption for heat losses and for overcoming viscous friction in the lime solution dosing process. The most important result of the research is the substantiation of the pellet production technology using the self-propelled Metitron 560 combine harvester using a special lime solution dispenser for extruded straw, which ensures the highest rate of methane release. The significance of the research results is that the use of pellets of extruded straw and lime allows to increase the rate of methane release by more than 60% compared to the fermentation of untreated straw. It is advisable to use an autonomous energy-efficient dispenser on the Metitron 560 harvester, which is capable of producing pellets of 6 to 12 mm in size from straw of various crops directly in the field with the addition of lime solution to increase biogas output. The advantage of using pellets from extruded wheat straw is also that such raw materials are better transported and stored in warehouses, which is necessary for the continuous operation of biogas plants, since agricultural waste is seasonal.

Key words: *optimal management, autonomous dispenser, lime solution, straw, pellets for biogas plants*