

*Шифр: «Подрібновач-змішувач БГУ»*

**ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ  
ПОДРІБНЮВАЧА-ЗМІШУВАЧА БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ**

**СЕКЦІЯ «АВТОМАТИЗОВАНІ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ  
СИСТЕМИ»**

***БЕРЕЖАНИ 2022***

## АНОТАЦІЯ

**Актуальність роботи.** Україна є енергодефіцитною країною та імпортує близько 75% енергоносіїв. Також українська промисловість є досить енергоємною, оскільки в 3-5 рази перевищує відповідні показники економічно розвинутих країн, тому Україна є надзвичайно чутлива до умов імпортування природних енергоносіїв.

У сучасному світі, із постійним зростанням показників споживання і як наслідок - обмеженими енергоресурсами, стрімких обертів набирає розвиток технологій одержання енергії з альтернативних джерел.

Перспективним шляхом доповнення і часткової заміни традиційних видів енергії є отримання і використання біогазу [15]. Важливим аргументом на користь цього джерела енергії є необхідність вирішення на сучасному рівні екологічних проблем, пов'язаних з утилізацією відходів. Однією з основних тенденцій при екологічно безпечній переробці органічних відходів є розвиток комплексних технологій утилізації біомаси за рахунок метанового зброджування, в результаті якого і утворюється біогаз.

Основним елементом технологічного обладнання, який забезпечує кількісний і якісний склад живильних речовин в бункерах накопичувачах біогазових установок (БГУ) є подрібнювачі-змішувачі [25].

Удосконалення систем електроприводу подрібнювачів-змішувачів біогазових установок з врахуванням фізико-хімічних властивостей подрібнюваних матеріалів є актуальною задачею, оскільки переробка різноманітних відходів дозволяє заощадити кошти та підвищити екологічність виробництв.

Зважаючи на це, даний напрямок є пріоритетним для економії традиційних енергоресурсів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Виконана робота, є складовою частиною вирішення наукового завдання з дослідження ефективності застосування біогазових технологій в рамках комплексної

державної науково-технічної програми «Енергетика та енергоефективність» затвердженої Кабінетом Міністрів України №543-р від 26.07.2018р. та відповідно до наукової тематики ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут» - «Дослідження відновлювальних джерел енергії та енергозберігаючих технологій в АПК» (номер державної реєстрації №0120U101845) та відповідно до Закону № 2712-VIII від 25.04 2019 р. «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії»

**Мета роботи і задачі дослідження.**

Метою роботи є удосконалення конструкції та системи керування електроприводу подрібнювача-змішувача біогазових установок з урахуванням фізико-механічних властивостей сировини.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- проаналізувати фактори, що впливають процес отримання біогазу з різних типів сировини; визначити їх оптимальне співвідношення з урахуванням підвищення його виходу та покращення якості;
- розробити конструкцію подрібнювача-змішувача в біогазовій технології, яка дасть можливість інтенсифікувати процес отримання біогазу;
- удосконалити схему керування електроприводом подрібнювача-змішувача БГУ.
- розробити імітаційну модель силової частини і системи керування електроприводу подрібнювача-змішувача з використанням засобів MatLAB/Simulink;
- дослідити параметри і режими роботи автоматизованого електроприводу.

**Об'єкт дослідження.** Електропривод подрібнювача-змішувача біогазових установок.

**Предмет дослідження.** Структура та параметри автоматизованого електроприводу подрібнювача-змішувача біогазових установок.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених завдань використовувались: теорія електроприводу; теорія електричних машин; теорія електричних кіл; методи математичного моделювання; основні положення опору матеріалів; теоретична механіка; експериментальні методи; спеціалізоване програмне забезпечення MatLAB/Simulink.

**Основні наукові та практичні результати, їх значення.** Підготовка субстрату перед зброджуванням, в першу чергу залежить від типу сировини та застосовуваної технології біогазового виробництва з метою забезпечення оптимального використання енергетичного потенціалу сировини і, відповідно, загальної ефективності біогазової установки. Підготовка сировинної бази може включати сортування та відокремлення сторонніх включень, подрібнення, перетирання та змішування (утворення однорідної консистенції маси) тощо.

Ступінь подрібнення та змішування сировини до певних розмірів допомагає збільшенню кількості дрібних частинок у субстраті, що дозволяє інтенсифікувати отримання біогазу на 30-50%.

Розроблена конструкція установки, яка дозволяє подрібнювати відходи рослинництва до розмірів частинок, здатних розкладатися в реакторі в короткий термін бродіння, а також твердий гній з одночасним їх змішуванням і зволоженням, підвищуючи тим самим вихід біогазу та ефективність БГУ.

Удосконалено схему керування електроприводом подрібнювача-змішувача БГУ. Основним керуючим елементом даної системи є блок керування (контролер), який програмно визначає необхідний режим живлення електродвигуна і керує роботою частотного перетворювача.

На основі аналізу способів керування швидкістю асинхронного електродвигуна, вибираємо електропривод зі скалярним керуванням. Використано перетворювач частоти з інвертором напруги SIMOVERT MASTERDRIVES, що має повний набір можливостей для реалізації поставлених завдань.

Розроблена імітаційна модель автоматизованого електроприводу подрібнювача-змішувача біогазових установок з використанням засобів

MatLAB/Simulink, що дасть можливість проводити дослідження його режимів роботи.

**Загальна характеристика наукової роботи.** Робота складається із вступу, 2 розділів і висновків. Загальний обсяг роботи становить 29 сторінок, в тому числі основний текст на 26 сторінках і список літератури з 32 найменувань на 3 сторінках.

**Апробація результатів дослідження.**

Із проведеного дослідження та практичної апробації підтверджено ефективність роботи автоматизованого електроприводу подрібнювача-змішувача біогазових установок у виробничих умовах.

Результати досліджень впроваджені в освітній процес ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут» при викладанні навчальних дисциплін «Автоматизований електропривод виробничих машин і механізмів», «Електропривод технологічних установок», «Енергозбереження та альтернативні джерела енергії», «Засоби та обладнання відновлювальної енергетики» та прийняті у виробничий процес ТзОВ «Агропродсервіс Інвест» смт. Козова Тернопільської області.

Матеріали за результатами досліджень опубліковані в збірнику наукових праць:

1. Рамш В.Ю., Потапенко М.В., Процик Ю.В. Удосконалення системи електроприводу подрібнювача-змішувача біогазових установок. The I International Scientific and Practical Conference «The latest problems of modern science and practice», January 11 – 14, 2022, Boston, USA. P.456-459.

2. Рамш В.Ю., Потапенко М.В., Процик Ю.В. Вибір способу регулювання швидкості електропривода подрібнювача-змішувача біогазової установки. The VII International Scientific and Practical Conference «Innovative trends in science, practice and education», February 22 – 25, 2022, Munich, Germany. P.521-523.

**ПОДРІБНЮВАЧ-ЗМІШУВАЧ, БІОГАЗОВА УСТАНОВКА,  
ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД,  
ЗАКОН КЕРУВАННЯ, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ.**

**ЗМІСТ**

<b>АНОТАЦІЯ.....</b>	<b>2</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>7</b>
<b>АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....</b>	<b>9</b>
<b>ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА .....</b>	<b>16</b>
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>25</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>27</b>

## ВСТУП

Загострення екологічних проблем органічними відходами тваринницької галузі, а також зростаючий дефіцит енергетичних ресурсів є головними мотивами інтенсифікації розробок у галузі виробництва та ефективного використання біогазу.

Біогаз представляє собою суміш, яка містить в складі від 55 до 75% метану, від 25 до 45 % вуглекислого газу, близько 1% сірководню і незначної кількості азоту і водню [5].

В анаеробних умовах (без доступу повітря) бактерії розкладають органічний субстрат, а біогаз є проміжним продуктом їх обміну.

Чим дрібніші частинки субстрату, тим більша поверхня зіткнення їх із бактеріями, у результаті період зброджування скоротиться, а метаноутворення прискориться. Для цього при необхідності проводиться додаткове подрібнення субстратів перед подачею в біореактор.

Біогазові установки представляють собою виробничі об'єкти, що складаються з біореакторів, оснащених комплексом технологічних систем підготовки і подачі сировини, підігріву, перемішування, зберігання і використання біогазу, вивантаження і транспортування шламу [28].

Зброджування здійснюється в спеціальних герметичних ємностях – біореакторах, де створюються всі необхідні умови метаногенезу.

Технологія анаеробного зброджування дозволяє одержувати, крім джерела енергії у вигляді біогазу, високоякісні добрива та білково-вітамінні кормові добавки [4].

Швидкість розкладу органічних речовин в біореакторі залежить від процесів життєдіяльності бактерій, на які в свою чергу впливають зовнішні умови.

Особливо важливим в процесі анаеробного зброджування є створення оптимальних технологічних умов в біореакторі: температури, вологості,

надходження кисню, достатньої концентрації живильних речовин, допустимого значення рН.

Використання біогазу дає можливість одержання теплової і електричної енергії, що є особливо привабливим для фермерських господарств.

В даній роботі розглядається застосування технічних заходів щодо підвищення енергоефективності електроприводів. Особливу увагу приділено розробці автоматизованого електроприводу подрібнювача- змішувача БГУ.

На основі моделювання і дослідження у програмному середовищі Matlab/Simulink обґрунтовано вибір оптимальних параметрів силового блоку та схеми керування електропривода ПЧ-АД.



## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Під біогазовою установкою розуміють комплекс інженерних споруд, що складається з наступних систем [28]:

- підготовки сировини;
- виробництва біогазу та добрив;
- очищення та зберігання біогазу;
- виробництва електроенергії та тепла;
- автоматизованої системи керування БГУ.

Метантенк БГУ повинен бути герметичний, у нього не повинно бути доступу кисню, тому що тільки за відсутності кисню можлива життєдіяльність метаноутворюючих бактерій. Оптимальна температура метаногенезу залежить від виду субстрату, що переробляється установкою (органічних відходів). Контрольно-вимірювальні прилади, що встановлюються, повинні забезпечувати контроль рівня субстрату в метантенку, температури та тиску всередині нього.

Сучасні технології дозволяють переробляти в біогаз будь-які види органічної сировини, проте найефективніше використання біогазових технологій для переробки відходів тваринницьких та птахівницьких ферм та стічних вод, оскільки вони характеризуються сталістю потоку відходів у часі та простотою їх збору.

Якість сировини, що завантажується в метантенк біогазової установки, характеризується вологістю, швидкістю його розщеплення та ступенем розкладання, наявністю в ньому живильного середовища для життєдіяльності бактерій, виходом біогазу на одиницю сухої речовини та вмістом метану в біогазі (табл. 1).

Вихід біогазу та вміст у ньому метану для різних типів сировини [32]

Тип сировини	Вихід біогазу із 1 кг сухої речовини, л/кг	Вміст метану в біогазі, %
Трава	630	70
Деревне листя	210-294	59
Соснові голки	37	69
Картопляне бадилля	420	60
Стебла кукурудзяні	420	53
Полова	615	62
Солома пшенична	342	58
Солома лляна	359	59
Соняшникове лушпиння	300	60
Твердий гній ВРХ	200-300	60
Кінський гній з соломою	250	56-60
Домашні відходи і сміття	600	50
Фекальні залишки	215-312	60
Тверді залишки стічних вод	570	70

Швидкість розщеплення сировини визначає час перебування його в ферментаторі і чим менший цей час, тим більш економічна установка.

Активний обмін речовин і висока швидкість біохімічних обмінних процесів у метантенку досягається, за рахунок максимальної підтримки та безперервного оновлення величин граничних поверхонь між твердою та рідкою фазами. Тому тверді матеріали, особливо рослинного походження, повинні бути попередньо підготовлені за допомогою ріжучих, розривних або плющильних пристроїв, щоб в результаті ефективного механічного впливу отримати частинки як можна меншого розміру. Частка зважених у рідині твердих частинок значною мірою залежить від технічних засобів, які використовуються для отримання ретельного перемішування, гідравлічного

транспортування субстрату та відділення біогазу. Сучасний рівень розвитку БГУ дозволяє переробляти субстрати з вмістом сухої речовини до 12%, якщо розмір волокнистих або стеблових елементів не перевищує 30 мм.

У метантенку необхідно організувати періодичне перемішування субстрату, що забезпечує ефективну та стабільну роботу БГУ [22].

Метою перемішування є вивільнення утвореного біогазу, перемішування свіжого субстрату і бактерій, запобігання утворенню кірки та осаду, недопущення утворення ділянок різної температури всередині метантенку, забезпечення рівномірного розподілу бактерій, запобігання формуванню порожнин і скупчень, що зменшують ефективну площу метантенку. При виборі методу перемішування потрібно враховувати, що процес зброджування представляє собою процес життєдіяльності симбіозу різних штамів бактерій і при руйнуванні цієї сукупності процес ферментації буде непродуктивним до утворення нової групи бактерій. Тому занадто часте або тривале перемішування є також шкідливим. Рекомендується повільне перемішування субстрату через кожні 4-6 год.

Оптимальне перемішування сировини підвищує вихід біогазу до 50% [7].

У психрофільному режимі оптимальна температура в метантенку 15 - 20 °С, але може бути і нижчою. У цьому режимі відходи переробляються 30 – 40 днів. Психрофільний режим зазвичай використовується в літню пору року у випадку, коли тепло і кількість субстрату (відходів) значно менше звичайного, наприклад, через випасання худоби.

У мезофільному режимі за температури 30 – 40 °С органічні відходи переробляються 7 – 15 днів, залежно від виду відходів.

У термофільному режимі при температурі 52 – 56 °С органічні відходи переробляються за 5 – 10 днів, при цьому якість біогазу та добрив, за рядом показників, зазвичай нижча, ніж у мезофільному режимі. Крім того, в термофільному режимі традиційно споживається більше енергії для обігріву. Такий режим підходить найбільше в тому випадку, коли основним завданням є переробка великої кількості відходів. При оптимізації роботи установки та

складу відходів можна прискорити переробку навіть до 3 – 4 днів. Вигода від роботи в термофільному режимі полягає в тому, що різко знижується вартість 1 кВт встановленої потужності біогазової установки.

Вимоги до допустимих меж коливання температури субстрату, для оптимального газоутворення, тим жорсткіше, чим вища температура процесу ферментації: при психрофільному температурному режимі –  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  на годину; мезофільному -  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  на годину; термофільному –  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  за годину [2,3].

Якщо, наприклад, у регіоні середньорічна температура вихідного субстрату, становить близько  $10^{\circ}\text{C}$ , а температура навколишнього середовища, близько  $4^{\circ}\text{C}$ , то необхідність у системі підігріву субстрату та підтримання його температури у процесі ферментації є очевидною. Відомо, що до 60% отриманого біогазу витрачається на власні потреби БГУ [27]. При цьому найбільш енергоємним є процес нагрівання субстрату, добової дози завантаження метантенка, на який йде близько 95% енергії, що витрачається на власні потреби установки.

Найбільш поширеною системою підігріву є зовнішня система підігріву з водонагрівальним котлом (котельною установкою), що працює на біогазі, електричній енергії або твердому паливі, де теплоносієм є вода з температурою близько  $60^{\circ}\text{C}$ . Більш висока температура теплоносія, підвищує ризик налипання зважених частинок на поверхні теплообмінника - теплообмінники рекомендується розташовувати в зоні дії змішувача.

Біогазова установка має бути автоматизованою. Обсяг автоматично виконуваних операцій БГУ різного призначення може бути різним.

Найважливішими факторами, що впливають на продуктивність біогазових установок, є правильний вибір компонентів сировини, з якого виробляється біогаз, і грамотна їх підготовка до ферментації [8,16].

Якість сировини, що завантажується у ферментатор біогазової установки, характеризується вологістю, швидкістю його розщеплення та ступенем розкладання, наявністю в ньому живильного середовища для життєдіяльності

бактерій, виходом біогазу на одиницю сухої речовини, вмістом метану в біогазі та співвідношенням вуглецю та азоту в сировині.

Саме від цих показників залежить час його збродження, кількість біогазу, що отримується, і його склад.

Підвищення ефективності біогазової установки визначається вибором компонентів за однорідністю та ступенем попереднього їх подрібнення, останнє впливає на кількість виробленого газу через тривалість періоду збродження. Тверді матеріали, особливо рослинного походження, у складі суміші повинні перевищувати 12 % і бути попередньо подрібнені до розмірів частинок не більше 30 мм за допомогою ріжучих, розривних або плющильних пристроїв перед подачею ферментатор [19].

Величезний потенціал відходів рослинництва, відходів очищення та переробки зернової сировини на даний час майже не використовується, зокрема ріпакова солома, солома зернових культур, бурякова та картопляна гичка та ін. Для їх подрібнення та змішування з твердою фракцією гною перед подачею в біореактор розроблена спеціальна установка (рис. 1).

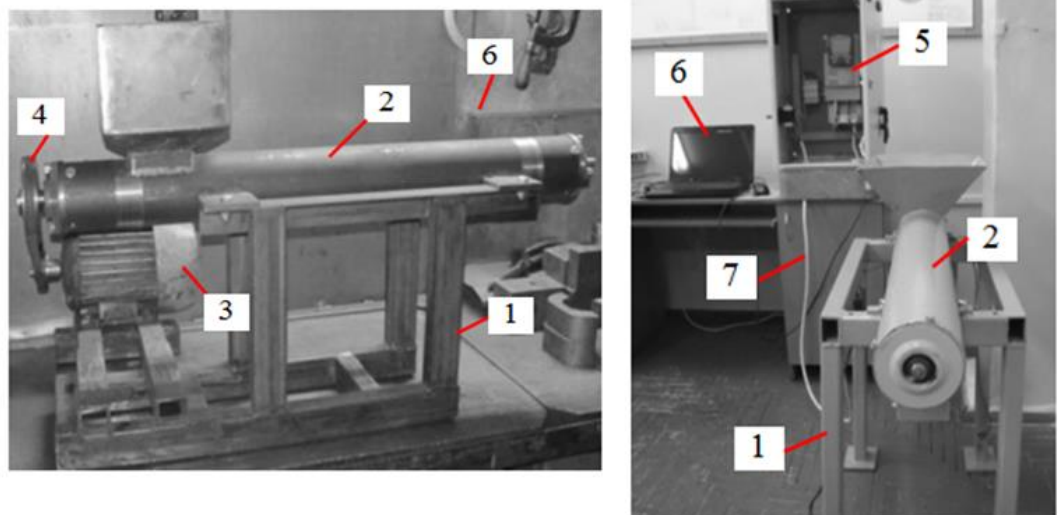


Рис.1 – Загальний вигляд установки: 1 – основна рама; 2 – транспортер-подрібнювач; 3 – електродвигун; 4 – клинопасова передача; 5 – керуючий пристрій; 6 – персональний комп'ютер; 7 – комутаційне з'єднання

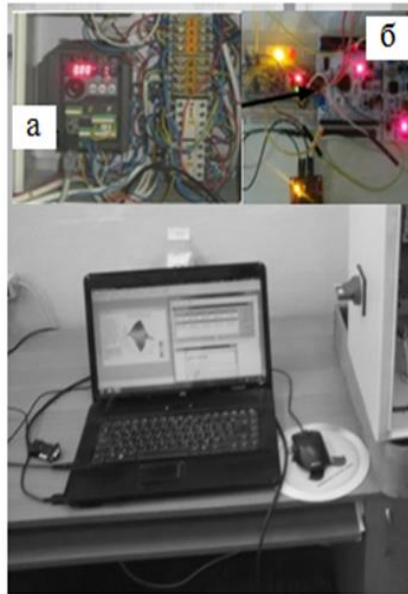


Рис.2 – Загальний вигляд керуючого пристрою:

а – частотний перетворювач; б – плата керування роботою пристрою.

Особливістю розробленої конструкції подрібнювача-змішувача є те, що він дає можливість руйнувати тіло стебла комбінованим методом (різання, перетирання, плющення, змішування). Поєднання цих методів дозволяє значно інтенсифікувати процес деградації біомаси в біореакторі при виробництві біогазу.

Розроблений подрібнювач-змішувач складається з ротора 1 (рис.3, а), на робочій поверхні якого розміщені подрібнюючі сегменти, причому останні встановлені зустрічно під кутом до осі ротора. Таке розміщення забезпечує зосередження подрібнюваної біомаси в робочій зоні агрегату. На краях ротора розміщені реборди б, по яких в момент запуску ковзають протирізальні пластини 2. Протирізальні пластини (рис.3, б) на бічній поверхні мають канавки для відведення подрібненої маси. Підбарабання набирається з протирізальних пластин, які нанизуються на трос і таким чином утворюється еластична конструкція, яка облягає поверхню ротора та зводить до мінімуму зазор між робочими органами подрібнювача-змішувача. Для забезпечення робочого натягу підбарабання в конструкцію введено пружини 3.

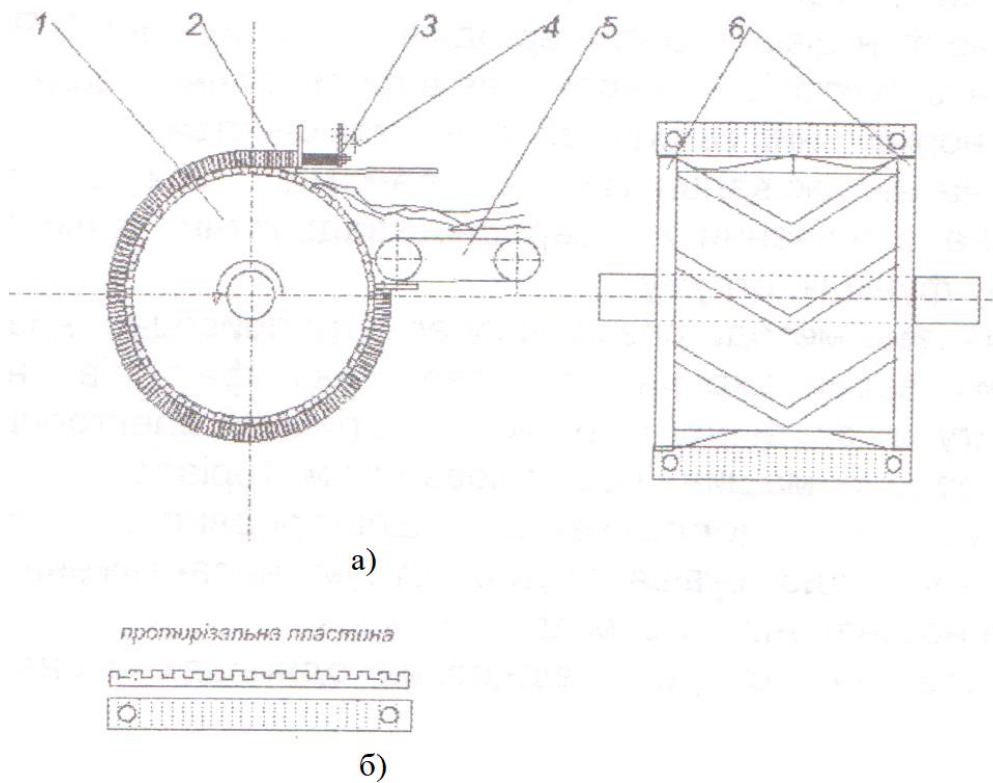


Рис. 3 – Конструкція подрібнювача-змішувача (а),  
протиризальні пластини (б)

Подрібнювана біомаса подається транспортером 5. Останній працює в старт-стопному режимі і керується контактором 4 розміщеним на робочій пружині 3. При подачі біомаси транспортером, остання захоплюється робочими органами ротора, що обертається за ходом руху маси та потрапляє в зону подрібнення, з якої подрібнена маса виходить через пази в протиризальних пластинах. При захопленні надмірної порції біомаси відбувається стиск пружини 3 та спрацювання контактора 4, який відключає привод транспортера до моменту подрібнення цієї порції біомаси. Така конструкція робочих дозволяє забезпечити процес саморегулювання технологічних параметрів подрібнювача-змішувача в цілому.

Застосування даної установки дозволить подрібнювати відходи рослинництва до розмірів частинок, здатних розкладатися в біореакторі в короткий термін бродіння, наприклад, рапсову солому, відходи після очищення зерна та ін., а також твердий гній з одночасним їх змішуванням і зволоженням, підвищуючи тим самим вихід біогазу та ефективність біогазової установки.

## ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

Розробка систем електроприводу подрібнювачів-змішувачів біогазових установок з врахуванням фізико-хімічних властивостей подрібнюваних матеріалів є актуальною задачею, оскільки переробка різноманітних відходів дозволяє заощадити кошти та підвищити екологічність виробництва.

Для керування електроприводом даного подрібнювача-змішувача запропоновано структурну схему, яка представлена на рис. 4 [25].

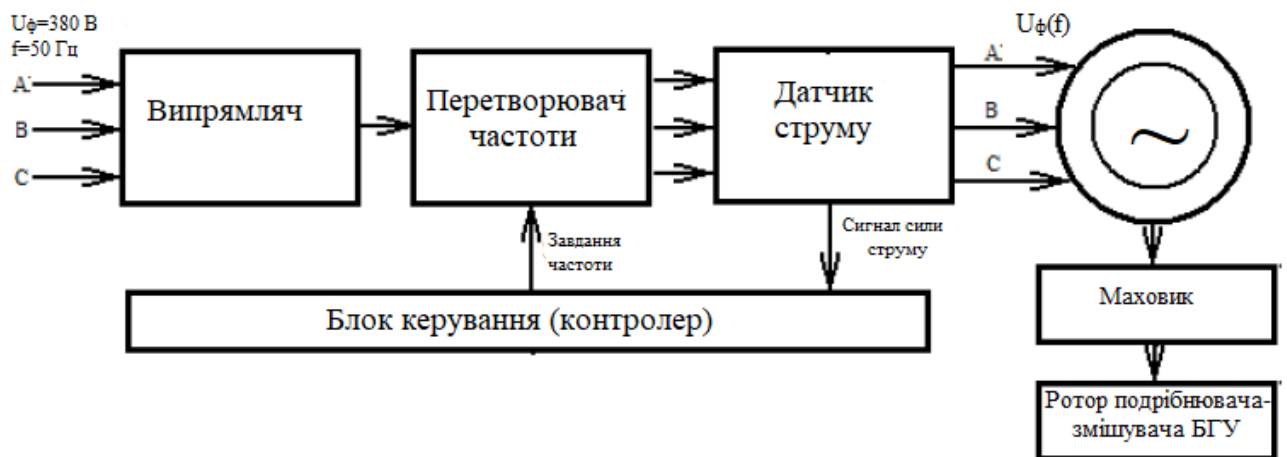


Рис. 4 – Структурна схеми автоматизованого електроприводу подрібнювача-змішувача БГУ

У відповідності до структурної схеми (рис. 4), система керування електроприводом подрібнювача-змішувача живиться від трифазної мережі з фазною напругою 380 В, частотою 50 Гц. Живлення подається на випрямляч, який формує постійний струм, що необхідний для інверторного перетворювача частоти, який формує трифазний струм, що може мати різні значення фазної напруги  $U_\phi$  і частоти  $f$ . На вході живлення електродвигуна встановлено датчик струму, що формує на своєму виході сигнал, рівень якого залежить від моменту опору на валу електродвигуна. Сигнал датчика струму є основним керуючим показником для визначення частоти живлення і фазної напруги.

Керуючими пристроями приводів є програмовані мікроконтролери та промислові комп'ютери, а алгоритми управління реалізуються у вигляді програм [9].



Основним керуючим елементом даної системи є блок керування (контролер), який програмно визначає необхідний режим живлення електродвигуна і керує роботою частотного перетворювача.

Для запобігання аварійним режимам роботи системи, а саме, коли для ротора момент опору перевищує момент інерції, доцільним є використання масивного маховика ротора, що значно збільшує його момент інерції та пружної муфти, яка завдяки пружності елементів, а саме набору циліндричних пружин розтягу, дозволяє електродвигуну набрати необхідну кількість обертів та унеможлиблює перевищення критичного значення моменту опору для електродвигуна.

При завантаженні відходів в подрібнювач-змішувач момент опору зростає і якщо він почне перевищувати максимальне значення для режиму роботи з номінальною швидкістю, то блок керування повинен зменшити частоту живлення. Якщо ж момент зменшується, то необхідно збільшувати частоту.

При частотному керуванні швидкістю асинхронного електродвигуна має водночас змінюватись частота  $f$  та амплітуда  $U$  напруги живлення. Співвідношення між напругою живлення і частотою може визначатись за різними законами.

Розрізняють два основні способи частотного керування в системі перетворювач частоти - асинхронний двигун: скалярне та векторне [10,18].

Для скалярного керування розрізняють три закони регулювання напруги та частоти залежно від виду та характеру навантаження електроприводу.

При постійному моменті навантаження  $M_c = const$ , керування напругою та частотою струму статора асинхронного двигуна повинно виконуватись згідно закону

$$U_{1j} / f_{1j} = const. \quad (1)$$

Згідно з (1) частота повинна змінюється пропорційно зміні напруги. Це забезпечує незмінне значення критичного моменту та незмінний номінальний магнітний потік при широкому діапазоні керування швидкістю від нулю і до

максимальної. Найчастіше в якості максимальної виступає номінальна швидкість, якій відповідає номінальна напруга статора.

Розглянутий закон частотного керування швидкості асинхронного двигуна є основним. Його перевагою є плавна зміна швидкості від нуля і до максимальної (номінальної) при незмінній жорсткості механічних характеристик та перевантажувальній здатності двигуна. Діапазон керування складає 5...10 для розімкнутих систем та 1000 і більше для замкнених [14].

При нелінійно-спадаючому навантаженні  $M_c = k \cdot \omega^{-1}$  – закон керування напругою та частотою набуває вигляду

$$U_{1j}^2 / f_{1j} = const. \quad (2)$$

Для цього закону момент двигуна змінюється обернено пропорційно, а синхронна швидкість пропорційно частоті, тому потужність, як їх добуток залишається незмінною.

Для вентиляторів і насосів, статичний момент яких пропорційний квадрату швидкості  $M_c = k \cdot \omega^2$  напруга і частота змінюються відповідно до залежності

$$U_{1j} / f_{1j}^2 = const. \quad (3)$$

Виходячи з вимог до електроприводу подрібнювача-змішувача та на основі аналізу способів керування швидкістю асинхронного електродвигуна, вибираємо електропривод зі скалярним керуванням [20,29]. Застосовуємо перетворювач частоти з інвертором напруги SIMOVERT MASTERDRIVES блочного виконання серії 6SE70 фірми Siemens [6], що має повний набір можливостей для реалізації поставлених завдань.

Вибір несучої частоти інвертора здійснюється відповідно до рекомендацій фірми Siemens – виробника вибраного типу перетворювача частоти з урахуванням фактичного струму завантаження.

Рекомендоване максимальне значення несучої частоти залежить від номінальної вихідної потужності перетворювача та фактичного струму завантаження інвертора при максимальному навантаженні приводу.

Функціональна схема і зовнішній вигляд перетворювача частоти SIMOVERT MASTERDRIVES наведені відповідно на рис. 5 та рис. 6.

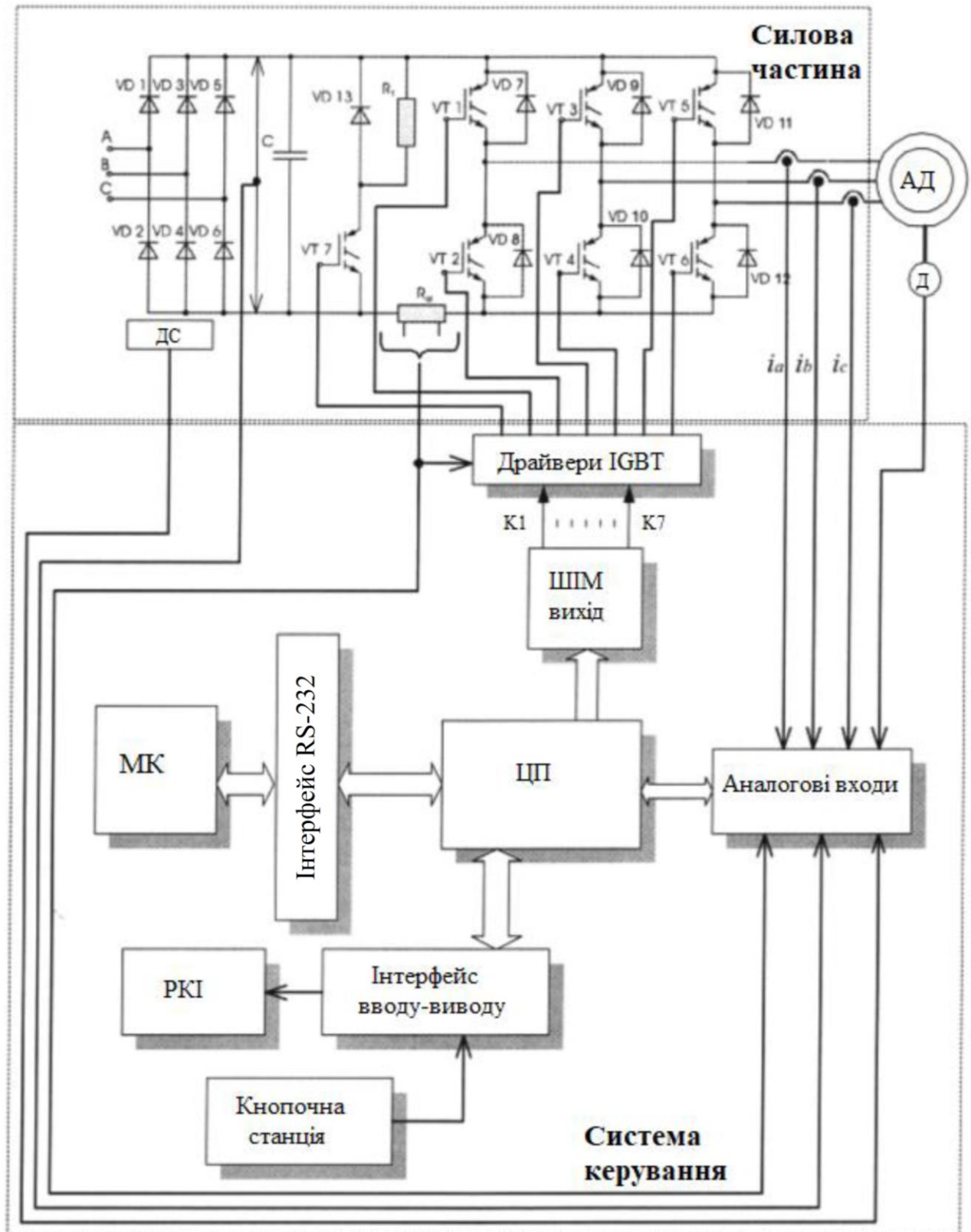


Рис. 5 – Функціональна схема перетворювача частоти



Рис. 6 – Зовнішній вигляд перетворювача частоти SIMOVERT MASTERDRIVES блочного виконання серії 6SE70

Структурна схема системи перетворювач частоти – асинхронний електродвигун (ПЧ-АД) наведена на рис. 7 [24].

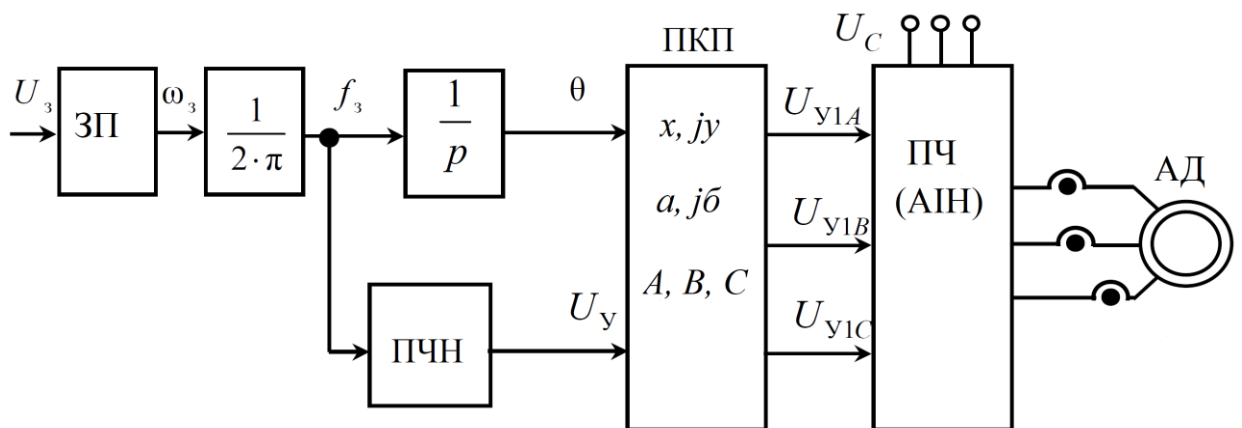


Рис. 7 – Структурна схема скалярної системи ПЧ-АД

Швидкість обертання в скалярному електроприводі ПЧ-АД визначається задаючою напругою  $U_3$ .

При скалярному регулюванні зміна швидкості досягається шляхом впливу на частоту  $f_1$  напруги на статорі  $U_{1\phi}$  при одночасній зміні модуля цієї напруги.

При регулюванні за законом  $U_{1\phi}/f_1 = const$  вид статичних характеристик електроприводу залежить від того, у якому співвідношенні знаходяться між собою значення частоти та напруга обмотки статора, які визначаються характером навантаження на валу електродвигуна. Оскільки навантаження подрібнювача-змішувача не залежить від швидкості його руху, то закон керування для даного механізму визначається виразом (1). Залежність  $U_{1\phi}/f_1 = const$  встановлюється у перетворювачі частота –напруга (ПЧН).

Схеми керування електроприводу змінного струму виконуються в системі координат, що обертається, де діють аналогові сигнали [1].

Модуль напруги керування  $U_y$  і миттєвий кут повороту  $\theta$  цієї напруги надходять на прямий координатний перетворювач (ПКП), де послідовно здійснюється перетворення напруги управління  $U_y$  з системи координат, що обертається  $x, jy$  в нерухому систему координат  $a, jb$ , а далі в трифазну систему координат  $A, B, C$ . Синусоїдальні напруги керування  $U_{y1A}, U_{y1B}, U_{y1C}$  надходять на вхід автономного інвертора напруги АІН і задають його вихідну фазну напругу  $U_{1\phi}$ , частотою  $f_1$ . Вихідні напруги інвертора  $U_{1A}, U_{1B}, U_{1C}$  подаються на обмотки статора короткозамкнутого асинхронного двигуна АД.

Механічні характеристики електродвигуна з синхронною частотою обертання 3000 об/хв при різних частотах живлення за законом керування  $U_{1\phi}/f_1 = const$ , розраховані в програмному середовищі MathCAD, в діапазоні частот 30...70 Гц наведені на рис. 8.

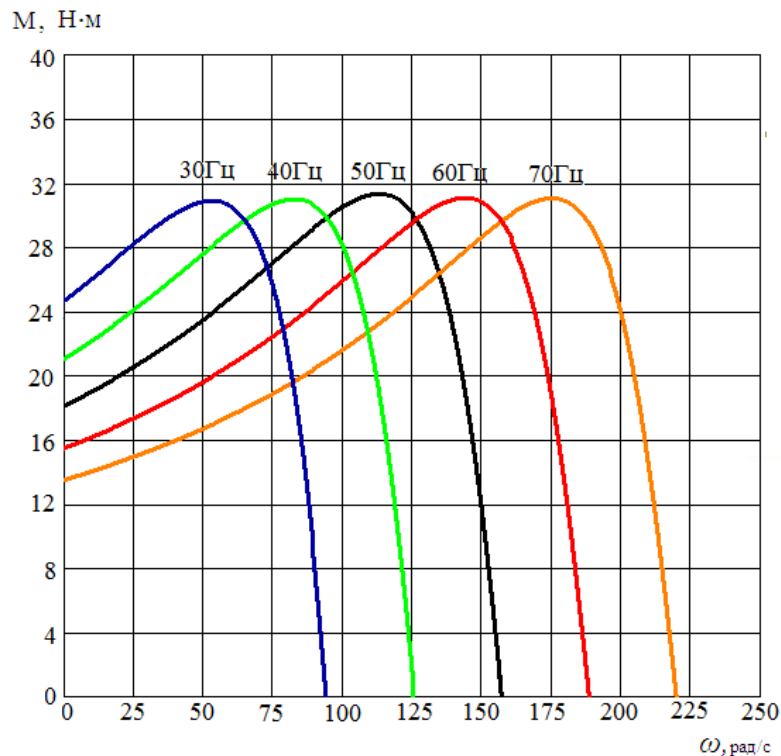


Рис. 8 – Механічні характеристики електродвигуна з синхронною частотою обертання 3000 об/хв при різних частотах живлення за законом

$$\text{керування } U_{1\phi}/f_1 = const$$

Закон регулювання  $U_{1\phi}/f_1 = const$  вибраний для електроприводу подрібнювача-змішувача виходячи з необхідності підтримки у всьому діапазоні регулювання швидкості постійної перевантажувальної здатності двигуна.

В свою чергу при законі регулювання  $U_{1\phi}/f_1 = const$  не забезпечується незалежність критичного моменту від частоти, що впливає на характер перехідних процесів при зниженні частоти.

Для дослідження якості перехідних процесів пуску двигуна системи перетворювач частоти – асинхронний двигун вибрано програмне середовище MATLAB/Simulink [11].

MATLAB є високоефективним засобом для розв'язання широкого спектра обчислювальних задач і моделювання технологічних процесів.

У MATLAB вбудовані інструментальні пакети (Toolbox) розширень із додатковими функціями для їх використання під час розв'язання спеціалізованих задач [12,17].

Зокрема, Simulink – інтерактивний інструмент для моделювання, імітації й аналізу динамічних систем. Він дає можливість будувати графічні блок-діаграми, імітувати динамічні системи, досліджувати працездатність систем й удосконалювати проекти. Simulink повністю інтегрований з MATLAB, що забезпечує негайний доступ до широкого спектру інструментів аналізу й проектування.

Побудовано імітаційну модель силових кіл електроприводу ПЧ-АД, яка наведена на рис. 9.

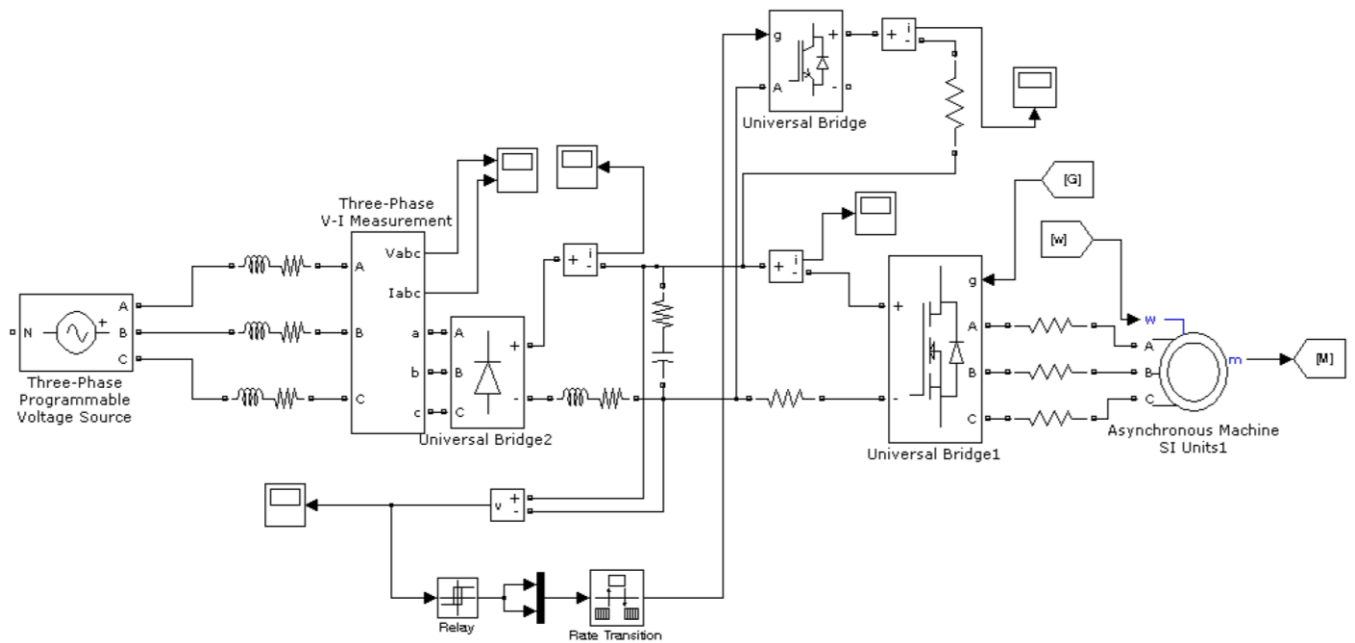


Рис. 9 – Імітаційна модель силових кіл електроприводу ПЧ-АД

Імітаційна модель електроприводу подрібнювача-змішувача БГУ також буде враховувати активні та індуктивні опорів проводів та кабелів необхідні для його підключення до мережі і електродвигуна.

Схема керування електроприводом, що включає прямий координатний перетворювач та систему керування ключами інвертора наведена на рис. 10.

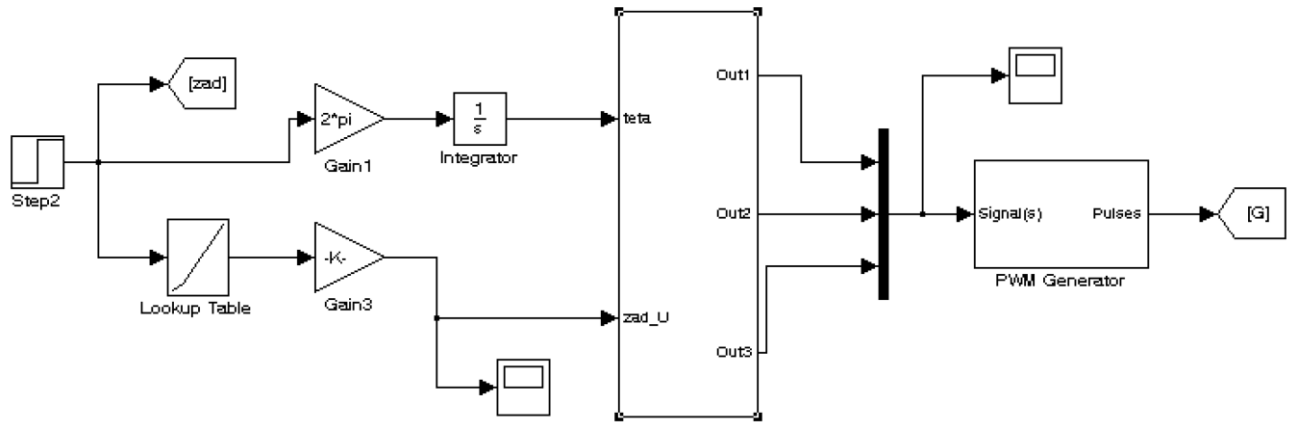


Рис. 10 – Схема керування електроприводом, що включає прямий координатний перетворювач та систему керування ключами інвертора

В результаті проведених досліджень електроприводу на імітаційній моделі встановлено, що модель електроприводу враховує реальний спад напруги на діодах випрямного моста та транзисторах інвертора напруги.

Частоту напруги на виході інвертора необхідно збільшувати, щоб компенсувати спад напруги на напівпровідникових приладах перетворювача частоти.

В реальному електроприводі одним із найпростіших шляхів збільшення жорсткості механічних характеристик асинхронного електроприводу та його критичного моменту є збільшення напруги на обмотках статора двигуна на низьких частотах за законом регулювання, який відмінний від закону  $U_{1\phi}/f_1 = const$ .

Використання частотного керування електроприводом подрібнювача-змішувача біогазових установок призведе до підвищення надійності його роботи.



## ВИСНОВКИ

1. Біогаз - це газ, близький за своїми характеристиками до природного газу. Для отримання біогазу використовуються біогазові установки, які дозволяють одночасно вирішити питання щодо утилізації органічних відходів та скоротити дефіцит енергетичних ресурсів.

2. В роботі проаналізовано фактори, що впливають процес отримання біогазу з різних типів сировини з метою визначення їх оптимального співвідношення.

3. Підвищення ефективності біогазової установки визначається вибором компонентів за однорідністю та ступенем попереднього їх подрібнення. Подрібнення та змішування сировини допомагає збільшенню кількості дрібних частинок у субстраті, що дає можливість інтенсифікувати отримання біогазу на 30-50%.

4. Розроблена конструкція подрібнювача-змішувача БГУ, яка дає можливість руйнувати тіло стебла комбінованим методом (різання, перетирання, плющення, змішування).

5. Застосування даної конструкції дозволяє подрібнювати відходи рослинництва до розмірів частинок, здатних розкладатися в реакторі в короткий термін бродіння, наприклад, рапсову солому, відходи після очищення зерна та ін., а також твердий гній з одночасним їх змішуванням і зволоженням, підвищуючи тим самим вихід біогазу та ефективність БГУ.

6. Удосконалено схему керування електроприводом подрібнювача-змішувача БГУ.

7. Виходячи з вимог до електроприводу подрібнювача-змішувача БГУ та на основі аналізу способів керування швидкістю асинхронного електродвигуна, вибрано електропривод зі скалярним керуванням за законом  $U_{1j}/f_{1j} = const$ .

8. Закон керування  $U_{1\phi}/f_1 = const$  вибраний для електроприводу подрібнювача-змішувача БГУ виходячи з необхідності підтримки у всьому

діапазоні регулювання швидкості постійної перевантажувальної здатності двигуна.

9. Застосовано перетворювач частоти з інвертором напруги SIMOVERT MASTERDRIVES блочного виконання серії 6SE70 фірми Siemens, що має повний набір можливостей для реалізації завдань системи керування.

10. Дослідження якості перехідних процесів пуску двигуна системи ПЧ – АД проведено в програмному середовищі MATLAB/Simulink. При моделюванні обґрунтовано оптимальні параметри і режими роботи системи ПЧ-АД.

11. В результаті проведених досліджень електроприводу на імітаційній моделі встановлено, що модель електроприводу враховує реальний спад напруги на діодах випрямного моста та транзисторах інвертора напруги.

12. Використання частотного керування електроприводом подрібнювача-змішувача БГУ призведе до підвищення надійності його роботи.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Bose Bimal K. Modern power electronics and AC drives. Prentice Hall PTR, 2002. 738 p.
2. Gerber M., Span R. An analysis of available mathematical models for anaerobic digestion of organic substances for production of biogas. Paris: IGRC, 2008. 30 p.
3. Kiely G., Tayfur G., Dolan C., Tanji K. Physical and mathematical modeling of anaerobic digestion of organic wastes. Water Research. Oxford: Pergamon, 1997. Vol. 31. No. 3. P. 534 – 540.
4. Kigozi R., Muzenda E., Aboyade A.O. Biogas technology: Current trends, opportunities and challenges. Renewable energy and environmental engineering. 2014. P. 311-317.
5. Scholz V., Ellerbrock V. Biomass and Bioenergy. 2002. V. 23. Issue 2. P. 81-82.
6. SIMOVERT MASTERDRIVES Engineering Manual for Drive Converters: Edition 05/2001.
7. Tabatabaei M., Ghanavati H. Biogas: fundamentals, process, and operation. 2018. № 6. P. 135-140.
8. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: теория и практика. М.: Колос, 1982. 148 с.
9. Белов М. П., Новиков А.Д. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. 3-е изд, доп. и перераб. М.: Академия, 2007. 576 с.
10. Браславский И. Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: АСАДЕМА, 2004. 202 с.
11. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2001. 320 с.

12. Гультияев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: Учебный курс. СПб.: Питер, 2000. 432 с.
13. Дайнеко В.А. Сибирикин Д.В и др Совершенствование системы управления технологическим процессом плющения и дробления зерна. Часть 3, с. 46-50
14. Ильинский Н. Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. вузов. М.: Издательский дом Академия, 2008. 208 с
15. Корчемний М.О., Федорейко В.М, Щербань В.А. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. 984 с.
16. Куценко Ю. М., Коломицев В. М. Аналіз основних чинників анаеробного метанового збродження для отримання біогазу. *Праці ТДАТУ*. 2011. Вип. 11, т. 3. С. 49–56.
17. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в Matlab: учебный курс. СПб.: Издательская группа ВHV, 2005. 512 с.
18. Масандилов Л. Б., Москаленко В.В. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. М.: Энергия, 1978. 96 с.
19. Никитин Г. А. Метановое брожение в биотехнологии. К.: Вища школа, 1990. 207 с.
20. Осипов, О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод. М.: МЭИ, 2004. 80 с.
21. Офіційний сайт Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України. Режим доступу: <https://www.sae.gov.ua> (дата звернення: 05.01.2022).
22. Поліщук В.М. Вплив режимів метанового бродіння на ефективність виробництва біогазу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування: Зб. наук. праць. Київ, 2013. № 185. Ч. 3 С. 180-191
23. Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії: Закон України від 25.04 2019 р. № 2712-VIII. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2712-19> (дата звернення: 05.01.2022).

24. Рамш В.Ю., Потапенко М.В., Процик Ю.В. Вибір способу регулювання швидкості електропривода подрібнювача-змішувача біогазової установки. The VII International Scientific and Practical Conference «Innovative trends in science, practice and education», February 22 – 25, 2022, Munich, Germany. P.521-523

25. Рамш В.Ю., Потапенко М.В., Процик Ю.В. Удосконалення системи електроприводу подрібнювача-змішувача біогазових установок. The I International Scientific and Practical Conference «The latest problems of modern science and practice», January 11 – 14, 2022, Boston, USA. P.456-459

26. Рамш В.Ю., Потапенко М.В., Шаршонь В.Л. Вибір критерію оптимізації подрібнювачів-змішувачів біогазових установок. *Енергетика і автоматика*. 2018. №1. С.135-144. Режим доступу: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/energiya2018.01.135/9330> (дата звернення 25.01.2022).

27. Савицкас Ю.Ю. Опыт эксплуатации биогазовых установок при анаэробной обработке органических отходов. *Промышленная теплотехника*. 2001. Т. 23. № 4-5. С. 128-131.

28. Семененко И. В. Проектирование биогазовых установок. Суми: П «МакДон», ИПП «Мрия-1» ЛТД, 1996. 347 с.

29. Синявський О.Ю., Савченко В.В., Козирський В.В., Бунько В.Я., Рамш В.Ю. Електропривод та автоматизація. К.: ФОП Ямчинський О.В. 2019. 619 с.

30. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. ДМК Пресс, 2008. 288 с.

31. Штейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

32. Эдер Б., Шульц Х. Биогазовые установки. Практическое пособие. К.: Зорг Украина, 2011. 268 с.