

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії і технічного сервісу

Допущений до захисту:
завідувач кафедри

(Підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

“ ” _____ 2020 р.

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕХНІЧНИХ
ЗАСОБІВ ДЛЯ ОБКАТКИ ТА ВИПРОБУВАННЯ ДВИГУНІВ
МАЛОГАБАРИТНИХ ТРАКТОРІВ**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 208 Агроінженерія

Виконав: студент заочної форми
навчання

Козаченко Микола Іванович

Керівник: к.т.н., доц.

Паладійчук Юрій Богданович

Вінниця 2020

Зміст

Анотація	5	
Вступ	7	
Розділ 1	СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1	Аналіз швидкісних режимів холодної обкатки двигунів внутрішнього згоряння	10
1.2	Аналіз навантажувально-швидкісних режимів гарячої обкатки двигунів внутрішнього згоряння	13
1.3	Аналіз технічних засобів для обкатки і випробування двигунів внутрішнього згоряння	18
1.4	Обґрунтування необхідності стендової обкатки двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки	25
Розділ 2	ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	28
2.1	Обґрунтування оптимального способу регулювання навантажувально-швидкісними режимами роботи асинхронного двигуна випробувального стенду двигунів малогабаритних тракторів	28
2.2	Математична модель системи регулювання навантажувально-швидкісних режимів роботи асинхронного електроприводу	32
2.3	Побудова системи регулювання навантажувально-швидкісними режимами роботи асинхронного електроприводу випробувального стенду двигунів малогабаритних тракторів	42
Розділ 3	МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	47
3.1	Стенд для обкатки і випробування двигунів малогабаритних тракторів	47
3.2	Експериментальне обладнання стенду для обкатки та випробувань двигунів малогабаритних тракторів	49
Розділ 4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	57

4.1	Результати симуляції процесу роботи випробувального стенду двигунів малогабаритних тракторів в режимі холодного обкатування	57
4.2	Технології стендової обкатки двигунів малогабаритних тракторів	62
Розділ 5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА СТЕНДОВОЇ ОБКАТКИ ДВИГУНІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ТРАКТОРІВ	69
	Висновки	73
	Список використаних джерел	75

Анотація

Магістерська робота містить 79 сторінок машинописного тексту та 8 листів презентаційного матеріалу. Текст записки включає в себе вступ, п'ять розділів, висновки та список літературних джерел, в тому числі 4 таблиці і 16 рисунків, використано 48 формул. Список використаних джерел містить 37 першоджерел.

В роботі розглядається проблема підвищення ефективності експлуатації двигунів внутрішнього згорання для малогабаритних тракторів, за рахунок ефективного проведення після продажно́ї чи післяремонтної обкатки. Основними несправностями малогабаритної техніки є вихід з ладу деталей ДВЗ. Загальна вартість ремонту ДВЗ за період експлуатації може перевищити загальну вартість самого двигуна в 5-6 разів. Тому питання покращення системи технічного сервісу двигунів малогабаритних тракторів є досить актуальним.

Одним із способів поліпшення технічного сервісу двигунів є проведення якісної заводської і післяремонтної обкатки, що дозволяє продовжити термін служби і збільшити ресурс ДВЗ. Робота ДВЗ на режимі повної потужності без попередньої обкатки може викликати швидкий знос поверхонь тертя деталей, привести до заклинювання, задирів і поломок. Тривалість експлуатаційної обкатки двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки варіюється від 20 до 100 годин в залежності від типу двигуна.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, ДВЗ, малогабаритні трактори, обкатка, припрацювання, холодна обкатка, гаряча обкатка, ремонт, технічне обслуговування.

Summary

The master's thesis contains 79 pages of typewritten text and 8 sheets of presentation material. The text of the note includes an introduction, five chapters, conclusions and a list of references, including 4 tables and 16 figures, using 48 formulas. The list of used sources contains 37 primary sources.

The paper considers the problem of increasing the efficiency of operation of internal combustion engines for small tractors, due to the effective conduct of after-sales or post-repair running-in. The main faults of small-sized equipment are the failure of internal combustion engine parts. The total cost of repair of the internal combustion engine during operation may exceed the total cost of the engine by 5-6 times. Therefore, the issue of improving the technical service system of engines of small tractors is quite relevant.

One of the ways to improve the technical service of engines is to conduct high-quality factory and post-repair running-in, which allows you to extend the service life and increase the life of the internal combustion engine. Operation of the internal combustion engine at full power without pre-run-in can cause rapid wear of the friction surfaces of parts, lead to jams, burrs and breakdowns. The duration of operation of engines of small agricultural machinery varies from 20 to 100 hours, depending on the type of engine.

Keywords: internal combustion engine, internal combustion engine, small tractors, running-in, running-in, cold running-in, hot running-in, repair, maintenance.

Вступ

Велику роль в механізації праці малих фермерів та індивідуальних присадибних товаровиробників відіграє малогабаритна сільськогосподарська техніка потужністю до 16 кВт. До неї малогабаритні 4 колісні трактори, 2 колісні мотоблоки, мотокультиватори, машини і обладнання, призначені для виконання різних сільськогосподарських та інших видів робіт в рослинництві, садівництві, городництві на невеликих за розміром ділянках, тваринництві і ін.

В Україні та пострадянських країнах випускаються понад 100 найменувань малогабаритної сільськогосподарської техніки. Загальна кількість експлуатованих на них двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) становить понад 5,5 млн. шт. З них двотактних - близько 37%, решта - чотиритактні. У сервісних центри та ремонтні підприємства щорічно надходить близько 30-70 тис. шт. несправних малогабаритних тракторів, мотоблоків, мотокультиваторів і іншої сільськогосподарської техніки обладнаної ДВЗ, причому більшість з дефектами ДВЗ.

Вартість ремонтів за період експлуатації може перевищувати вартість ДВЗ приблизно в 5 - 6 разів. Крім того, після ремонту помітно знижується продуктивність і ресурс двигуна. На підставі вищесказаного можна зробити висновок про необхідність поліпшення технічного сервісу малогабаритної сільськогосподарської техніки.

Одним із способів поліпшення технічного сервісу двигунів є проведення якісної заводської і післяремонтної обкатки, що дозволяє продовжити термін служби і збільшити ресурс ДВЗ. Стосовно до двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки заводами-виробниками і ремонтними підприємствами не проводиться стендова обкатка. Однак в технічній документації на такі ДВС вказується необхідність даної операції. Заводи-виробники рекомендують в початковий період експлуатації провести

попередню обкатку двигунів зважаючи на необхідність припрацювання деталей тертя.

Робота ДВЗ на режимі повної потужності без попередньої обкатки може викликати швидкий знос поверхонь тертя деталей, привести до заклинювання, задирів і поломок. Тривалість експлуатаційної обкатки двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки варіюється від 20 до 100 годин в залежності від типу двигуна. В цей період заводи-виробники рекомендують особливу увагу приділяти двигуну: перші годинник обкатки працювати тільки на холостому ході, застосовувати тільки рекомендовані види палива і масла, не навантажувати непрогрітий ДВЗ, а прогрів виконувати на середніх оборотах без навантаження.

Сучасні технології та технічні засоби для обкатки та випробувань ДВЗ широко застосовуються в автосервісах і великих дилерських станціях для двигунів потужністю понад 16 кВт. Однак адаптація їх для обкатки і випробувань двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки є технічно складною і економічно не вигідною через високу вартість таких технічних засобів. Тому вдосконалення технологій і технічних засобів для обкатки і випробування двигунів малогабаритних тракторів є актуальною науковою задачею.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є поліпшення технічного сервісу малогабаритних тракторів.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз можливих навантажувально-швидкісних режимів холодної та гарячої обкатки ДВЗ і засобів для їх реалізації.

2. Провести теоретичне обґрунтування способу регулювання навантажувально-швидкісних режимів роботи електричного обкатно-гальмівного стенду для двигунів малогабаритних тракторів і встановити математичні, структурні і функціональні зв'язки параметрів для побудови системи управління.

3. Розробити технічні засоби для обкатки і випробування двигунів малогабаритних тракторів.

4. Провести симуляційні дослідження функціональних можливостей технічних засобів для обкатки і випробування двигунів малогабаритних тракторів.

Об'єкт дослідження. Технології та технічні засоби для обкатки і випробувань двигунів малогабаритних тракторів.

Предмет дослідження. навантажувально-швидкісні режими роботи технічних засобів для обкатки і випробування двигунів малогабаритних тракторів.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз швидкісних режимів холодної обкатки двигунів внутрішнього згоряння

Типові технології обкатки ДВЗ, що застосовуються в ремонтних підприємствах і сервісних центрах, зазвичай включають в себе три етапи: холодна обкатка, гаряча обкатка без навантаження (на холостому ходу) і гаряча обкатка під навантаженням [1-5]. Однак думки за призначенням етапів обкатки і їх змістом є досить суперечливими.

Деякі фахівці дотримуються думки, що етап холодної обкатки доцільно виключити, а, на думку інших, даному етапу слід приділяти першорядну увагу, так як знос за цей період становлять від 20 до 70% початкового зносу деталей [1-5]. Так, наприклад, в роботі [6] показано, що холодна обкатка ДВС є важливим і відповідальним етапом технологічного процесу, так як саме в цей період відбувається найбільш інтенсивні процеси зношування і формування мікрогеометрії сполучень.

Етап холодної обкатки здійснюється згідно технічних вимог для двигунів кожної марки індивідуально. На даному етапі, загальною тривалістю 10 ... 120 хвилин, здійснюють перевірки взаємодії і функціонування деталей, а також виявлення можливих дефектів.

В процесі проведення холодної обкатки не допускаються наявність різких шумів і стуків в механізмах двигуна, а також порушення герметичності систем мастила, живлення та охолодження в місцях з'єднань. У разі появи несправностей обкатку припиняють і несправності усувають. При необхідності двигун знімають і повертають на повторний ремонт.

В даний час не існує загальноприйнятої методики, яка забезпечує оптимальний режим обкатки і підробітки ДВЗ [1, 3-6], тому вельми актуальним залишається питання впливу характеристик зміни швидкісних режимів на процес підробітки сполучених деталей. Одні фахівці

рекомендують плавне [1, 4], а інші ступеневу зміну швидкісного режиму [3, 5-6].

Так, дослідження, проведені в роботі [7], показали, що при ступінчастій обкатці якість поверхонь поліпшується незначно, інтенсивна зміна якості поверхонь тертя спостерігається тільки в початку кожного ступеня (протягом перших 10 хвилин роботи). Зміна шорсткості поверхні, мікротвердості поверхневого шару і коефіцієнта тертя в процесі припрацювання при плавному навантаженні і збільшенні швидкості тертя відбувається значно інтенсивніше (1,8 - 2 рази) в порівнянні зі ступінчастими режимами.

В роботі [8] рекомендується проводити холодну обкатку тільки при поступовому збільшенні швидкісного режиму. При цьому наголошується, що в початковий період припрацювання шийки вала ступінчастим способом спостерігається зростання мікротвердості поверхневого шару на 35-40%, даний аспект сприяє схоплюванню поверхонь тертя і збільшенні тривалості припрацювання, а використання безступінчастого режиму припрацювання викликає зростання мікротвердості поверхневого шару тільки на 15-20%, що дозволяє скоротити тривалість припрацювання [7].

Також існує багато суперечливих рекомендацій по призначенню швидкісних режимів холодної обкатки ДВЗ [9], тому питання вибору початкової частоти обертання двигуна при проведенні даного режиму обкатки залишається актуальним.

Зазвичай ремонтні підприємства починають обкатку двигуна з найменшої кількості оборотів, які вони визнають найбільш доцільним з тих чи інших міркувань. На ремонтних підприємствах, чи сервісах, для автомобільних та інші швидкохідних двигунів, часто застосовується холодна обкатка ДВЗ при 120 об/хв.

Однак, як зазначено в роботі [10], в середині ХХ століття вже проводилися дослідження, на підставі яких було зроблено заяву, що мале число оборотів при проведенні холодної обкатки не відповідає вимогам

раціональної обкатки. Автор пояснює це тим, що при малих швидкостях ковзання (5-10 об/хв..) знос зростає в кілька сотень разів у порівнянні з зносом, що відбувається при більш високих швидкостях.

Автор роботи [11] рекомендує вибирати швидкості ковзання вище критичних. Однак він же зазначає, що прагнення починати обкатку з найменшого числа оборотів є правильним з точки зору створення на поверхнях тертя мінімальних навантажень, але при цьому пояснює, що сутність вибору найменшого числа обертів при обкатці ДВЗ залежить від кількості масла, що подається до поверхонь тертя.

Ця особливість відзначається і в способі обкатки ДВС [7] в якому в початку процесу холодної обкатки задають мінімальну частоту обертання приводу стенду при якій забезпечується надійна мастило елементів тертя, і поступово збільшують частоту обертання колінчастого вала ДВЗ.

Результати дослідження, наведені в роботі [10], показують, що в перші хвилини обкатки має місце найбільша швидкість зносу двигуна з виділенням максимальної кількості тепла, внаслідок чого необхідне інтенсивне охолодження (подача великої кількості масла на поверхні тертя), що при малій кількості оборотів досить важко і, як наслідок, вимагає додаткових спеціально виготовлених засобів для його реалізації. Тому автор настійно рекомендує визначати мінімально допустиму кількість обертів для кожної марки ДВЗ індивідуально.

В роботі [9] відзначається, що при великій швидкості ковзання і малих навантаженнях процес припрацювання поверхонь вкладишів, вала, кілець і гільз вимагає більш тривалого часу в зв'язку з рідинним і напіврідинним режимом тертя. Зі зменшенням швидкості ковзання пов'язаних деталей відбувається більш інтенсивно через появу граничного тертя.

Сучасні технології холодної обкатки ДВЗ характеризуються підвищеним швидкісним режимом першого ступеня (500 ... 600 об/хв.), що становить 20 ... 40% від номінальної частоти обертання ДВЗ [10]. Це

пояснюється вузьким швидкісним діапазоном серійних випробувальних стендів, реалізованих за застарілими технологіями [9].

Сідашенко О.І [1] рекомендує обирати режими обкатки в залежності від моделі ДВЗ, що піддається обкатці. Рекомендує починати холодну обкатку з частот, що забезпечують швидкість обертання валу двигуна 400 ... 1000 об/хв., і, завершувати на швидкостях рівних 950 ... 1500 об/хв.

Тим часом, в роботі [4] відзначається, що при високих початкових швидкостях обертання зростає робота сил тертя в одиницю часу, інерційні сили і температура поверхонь, яка, незважаючи на підвищену продуктивність насоса системи змащення, може досягти критичних значень. Зі збільшенням інерційних сил також зростають сили, спрямовані проти неї [8].

Спосіб обкатки ДВС [10], в якому холодну обкатку двигуна починають на максимальних обертах, контролюючи при цьому концентрацію металевих частинок, що видаляються маслом, і після досягнення заданої величини концентрації знижують обороти до мінімальних, а циклічне переміщення органу подачі палива здійснюють з резонансною частотою для даного типу двигуна. Недоліком даного способу є складність його реалізації, так як попередньо потрібно визначення резонансної частоти, при якій швидкість припрацювання з'єднань максимальна, при цьому потрібно побудувати амплітудну і фазові частотні характеристики крутного моменту, визначити передавальну функцію, модуль цієї функції і резонансну частоту коливань органу подачі палива, відповідні максимальної швидкості обкатки.

В реальних умовах початок процесу обкатки відбувається при навантаженнях, вище критичних, що призводять до заклинювання, а, отже, до пластичних деформацій і високої інтенсивності зношування [1]. так, відповідно до методики обґрунтування режиму холодного обкатування, вибір оптимального режиму обкатки можна звести до визначення критерію заїдання і умов її підтримки на постійному рівні під час проведення процесу.

Тому холодна обкатка повинна закінчуватися при частоті обертання, на якій закінчується зростання сумарних навантажень. Цю теорію

підтверджують дослідження, представлені в роботі [12], згідно з якими проводити обкатку деталей ДВС необхідно на межі заклинювання, так як в цьому випадку досягається найбільша несуча здатність деталей.

Дослідження, представлені в роботі [13], показують доцільність завершення холодної обкатки ДВЗ після ремонту при підвищених частотах, близьких до номінальних. Це пояснюється тим, що на даних частотах обертання колінчастого вала досягається найкраще припрацювання нових поршневих кілець до поверхні попередньо експлуатованих гільз циліндрів.

Використання серійних обкатно-гальмівних стендів для реалізації розглянутих способів холодної обкатки ДВЗ складне завдання. Так наприклад, найпоширеніші обкатні стенди ГОСНИТИ (аудиторія 1001 Вінницький національний аграрний університет) на базі електромашин з фазним ротором не стійкі на знижених швидкісних режимах і вимагають включення до їх складу додаткового дорогого обладнання, що сильно ускладнює їх конструкцію і збільшує вартість таких стендів.

1.2 Аналіз навантажувально-швидкісних режимів гарячої обкатки двигунів внутрішнього згоряння

Після досягнення певного ступеня припрацювання з'єднань холодну обкатку припиняють і переходять до першого етапу гарячої обкатки ДВЗ – обкатці на холостому ході. На даному етапі здійснюється перевірка роботи всіх механізмів і систем двигуна, а також виконуються і усуваються дефекти складальних і регулювальних операцій [1]. У процесі обкатки ДВЗ на холостому ході (без навантаження) здійснюється поступове поетапне або плавне збільшення частоти обертання колінчастого вала до величини, що відповідає максимальній частоті холостого ходу.

У роботі [7] відзначається невисока ефективність обкатки ДВЗ без навантаження. Це пояснюється тим, що на з'єднання ДВЗ діють незначні газові навантаження, при яких дані сполучення працюють в режимі

гідродинамічного тертя. В роботі [8] також зазначено, що тривала обкатка ДВЗ без навантаження згубно впливає на сам двигун, так як виникає ймовірність закоксування форсунок. Тому, за рекомендацією більшості вчених, тривалість технологічного етапу гарячої обкатки ДВЗ на холостому ходу не повинна перевищувати 15 ... 30 хв. [1, 7-10], що цілком достатньо для виконання однієї з основних функцій даного етапу - перевірки працездатності ДВЗ і його прогріву перед початком етапу гарячої обкатки під навантаженням [1].

Питання про призначення швидкісного режиму гарячої обкатки ДВЗ на холостому ходу, а також тривалості кожного ступеня при ступінчастому зміні швидкісного режиму, є спірним [4]. Згідно технології обкатки, рекомендованої [1], в залежності від моделі ДВЗ, гарячу обкатку двигунів без навантаження починають з 1000 ... 1300 об/хв. і завершують при 1800 ... 2400 об/хв., а згідно з дослідженнями, проведеними в роботі [10], етап гарячої обкатки без навантаження необхідно починати з 1000 ... 1100 об/хв. і завершувати при 1400 ... 1500 об/хв.

Згідно з рекомендаціями [1], етап гарячої обкатки ДВЗ без навантаження проводять за трьома і більше ступенями, загальною тривалістю кожної з них від 5 до 20 хвилин. Кількість ступенів обкатки залежить від конкретної марки двигуна. Перший ступінь, як правило, починається при частоті обертання колінчастого вала, що дорівнює 45 ... 89% від номінальної і потім, через певні інтервали послідовним переключенням на наступні ступені доводять частоту обертання до номінальної [1, 7-11], а іноді і перевищує її - 111% [9], тобто до максимальної частоти обертання холостого ходу.

Гаряча обкатка ДВЗ без навантаження є важливим і необхідним етапом технологічної обкатки, в процесі якої здійснюється прогрів двигуна і оцінюється якість виготовлення, складання та регулювання ДВЗ, а також якість проведення холодної обкатки, що при грамотному виконанні дозволяє перейти до наступного етапу технологічної обкатки двигунів - етапу гарячої обкатки під навантаженням.

На думку більшості вчених і практиків [1, 7-11], гаряча обкатка ДВС під навантаженням є основним етапом технологічної обкатки і обов'язковою умовою отримання високого ступеня припрацювання з'єднань і підготовки поверхні тертя до сприйняття експлуатаційних навантажень [1].

Даний режим обкатки здійснюється на максимальному швидкісному режимі протягом певного часу при ступінчастому або плавному безступінчастому зростанні навантажень на припрацювання з'єднань [7].

У першому випадку до кінця кожного ступеня відбувається зниження інтенсивності припрацювання і стабілізація існуючих параметрів і показників (швидкості зношування, температури сполучень, сил тертя і ін.), що незважаючи на збільшення часу процесу припрацювання, сприяє отриманню більш стабільних показників якості припрацювання в умовах масового виробництва, а також знижує вимоги до технічних засобів для проведення обкатки ДВЗ [1, 7].

У другому випадку, в кожен момент обкатки забезпечується максимальна інтенсивність припрацювання, що сприяє зниженню часу припрацювання поверхні до двох і більше разів [7]. Однак даний режим є досить напруженим і протікає при підвищених температурах з'єднань, що вимагає стабільності вихідних параметрів з'єднань ДВЗ і точного дотримання закону збільшення навантажень і оперативного контролю процесу [10].

Недотримання цих норм може призвести до оплавлення поверхонь з'єднань і утворенню задирів [1].

Як було зазначено раніше, гаряча обкатка під навантаженням, згідно з типовими технологіям, здійснюється на максимальному швидкісному режимі протягом певного часу, проте в роботі [10] відзначається, що такий спосіб управління швидкісним режимом, через низку несправностей (наприклад, заклинювання рейки), може привести до резонансного збільшення частоти обертання колінчастого вала і виникнення аварійної ситуації.

При використанні на перших щаблях гарячої обкатки під навантаженням знижених швидкісних режимів, внаслідок зменшення подачі мастила в зони тертя, стає можливим створити режим напів гідродинамічного тертя і підвищити інтенсивність і якість припрацювання при зменшенні початкового зносу [13], проте в роботі [12] відзначається, що для отримання стабільних результатів необхідно точно дотримуватися швидкісних режимів і використовувати спеціальні протизадирні присадки в мастилі і паливі, що ускладнює реалізацію даного способу обкатки ДВЗ.

Для усунення розглянутих вище недоліків пропонується ряд способів обкатки ДВЗ [1, 5, 13], в яких величини частот обертання і навантажень змінюють за певними законами, які є, на думку авторів, найбільш оптимальними в даних випадках. Так, згідно зі способом [13], поступове збільшення навантаження здійснюють по коливальному закону при цьому коливання навантаження частоти обертання синхронізуються за часом, а їх частота збільшується від мінімального до максимальних значень.

Розглянутий спосіб характеризується рядом недоліків, а саме недостатньою ефективністю припрацювання, тривалістю обкатки, нестабільністю навантажувально-швидкісних режимів і можливістю появи резонансних явищ (через зміни навантаження по коливальному закону). Крім того, цей спосіб вимагає складного обладнання для своєї реалізації і точне дотримання режимів припрацювання.

Способи обкатки ДВЗ [8, 10], що використовують адаптивне управління режимами обкатки, частково усувають описані вище недоліки. В таких способах в якості діагностичних параметрів приймають температуру агрегату, момент на валу, обороти колінчастого валу, тиск в масляній магістралі, коефіцієнти інтенсивності процесу та інші технологічні параметри, що знаходяться в функціонального взаємозв'язку. Однак, ці способи мають істотний недолік - для їх реалізації потрібне складне і дороге устаткування, а також висока кваліфікація технічного персоналу, необхідне налаштування цього обладнання.

У сучасній науковій літературі [14, 15] прийнято виділяти два основних напрямки реалізації етапу гарячої обкатки під навантаженням: гальмівний і безгальмівний. Серед переваг першого вчені виділяють: гарну якість припрацювання з'єднань, малу трудомісткість і простоту його реалізації, універсальність по відношенню до типів двигунів і їх потужності, можливість автоматизації процесу обкатки, невисоку вартість і компактність використовуваних засобів, а серед недоліків - малий час динамічного навантаження при гарячій обкатці ДВЗ, знижене значення швидкісних режимів, підвищену тривалість обкатки в порівнянні з гальмівним способом [14, 15].

Недоліки другого в основному обумовлені недосконалістю конструкцій існуючих промислових стендів і пристроїв для їх реалізації, а саме великою потужністю, габаритами і вартістю. Тому сучасні випробувальні засоби повинні в повній мірі забезпечити реалізацію існуючих технологій обкатки та випробувань ДВЗ, а саме, мати можливість широкого регулювання навантажувально-швидкісних режимів випробовуваного двигуна.

1.3 Аналіз технічних засобів для обкатки і випробування двигунів внутрішнього згоряння

В даний час розроблені і застосовуються для обкатки та випробувань ДВЗ велика різноманітність стендів різних конструкцій. Серед найбільш поширених можна виділити стенди обкатувальні універсальні серій КС виробництва ТОВ «Копіс» [16], стенди для випробування ДВЗ «КОНТУР-СІД» виробництва ТОВ «Кер Інжиніринг» [17], і випробувальні стенди серії КИ ГОСНИТИ [18].

Подібні стенди можна розділити на гальмівні, в яких в якості гальма використовують електричні, гідравлічні або пневматичні навантажувальні пристрої і безгальмівні, коли навантаження і її зміна здійснюється за

допомогою маховика, зміною положення паливодозуючого органу, дроселя і рециркуляцією газів.

Найбільш яскравим представником стендів, які використовують без гальмівну обкатку ДВЗ, є обкатувальні універсальні стенди з динамічним вантаженням серії КС виробництва ТОВ «Копіс» (рисунок 1.1). Недоліком стендів даної серії є одношвидкісний режим холодного обкатування ДВЗ за допомогою тихохідного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (750 об/хв.), який включається в роботу за допомогою прямого пуску. Даний спосіб пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором може привести до утворення задирів, неприпрацювань поверхонь сполучень двигуна, а також до значних струмових перевантажень електричної мережі.



Рисунок 1.1 – Стенд КС 276 для обкатки двигуна.

Гальмівні стенди, в даний час, знайшли найбільш широке промислове застосування. Серед випробувальних стендів, виконаних по даній конструкції, необхідно виділити серію обкатно-гальмівних стендів КІ ГОСНИТИ, що складаються з трифазних асинхронних електричних машин з фазним ротором, пускової апаратури, настановних і сполучних пристроїв, систем вимірювання витрати палива і інших параметрів ДВЗ [18].

Характерною особливістю стендів виробництва ГОСНИТИ є використання властивості оборотності електричних машин, тобто при проведенні холодної обкатки вони працюють в руховому режимі, а при проведенні гарячої - в генераторному режимі [18]. У розглянутих стендах

застосовують електричні машини з номінальною частотою обертання ротора від 500 до 1500 об/хв. [9].



Рисунок 1.2 – Стенд для обкатки і випробовування двигунів ГОСНИТИ КИ-35503.

Недоліки гальмівних стендів, в тому числі і випробувальних стендів серії КИ ГОСНИТИ, складаються в основному з недоліків електричних навантажувальних пристроїв (гальм).

Навантажувальні пристрої для обкатки ДВЗ прийнято класифікувати в залежно від ступеня корисного використання енергії випробуваного двигуна [9]. На рисунку 1.3 представлена класифікаційна схема навантажувальних пристроїв, заснованих на зазначеному принципі.

До першої групи належать навантажують пристрої, в яких енергія випробуваного двигуна повністю втрачається або утилізація цієї енергії ускладнена. До таких пристроїв відносять індукторні, гідравлічні і механічні гальма, а також навантажувальні пристрої на базі машини постійного струму, навантаженої на активний опір [9, 24-27].

До другої групи належать навантажувальні пристрої, в яких енергія випробуваного двигуна частково рекуперується в електричну мережу [9, 24-27]. Навантажувальні пристрої даної групи є найбільш поширеними в нашій країні, саме їх в своїй конструкції використовують обкатно-гальмівні стенди серії КИ ГОСНИТИ, які, в даний час, знайшли найбільше застосування в ремонтних підприємствах України. До таких пристроїв відносять електричні

гальма на базі асинхронної машини з рідинним реостатом, на базі асинхронної машини з індукційним регулятором і навантажувальними пристроями на основі асинхронної машини з муфтою ковзання.

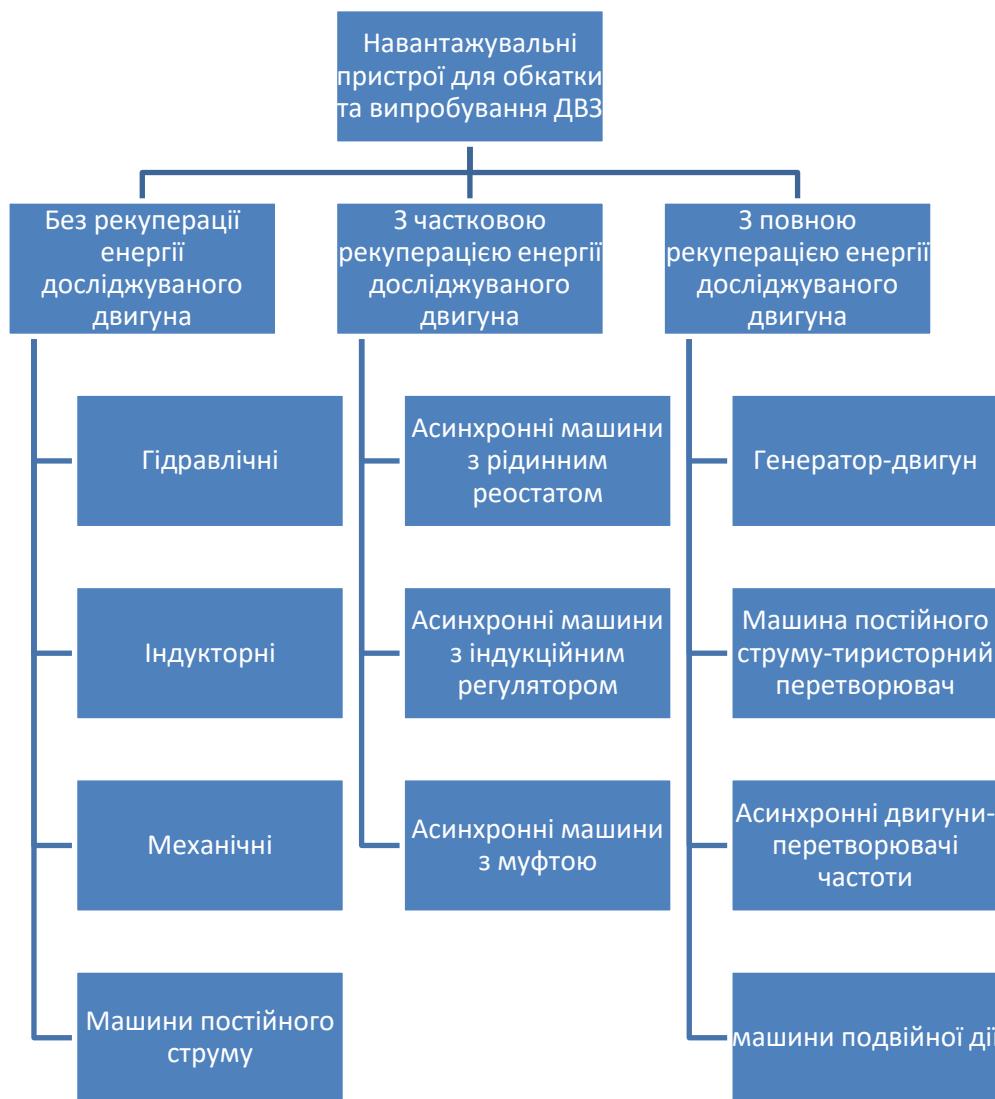


Рисунок 1.3 - Класифікаційна схема навантажувальних пристроїв.

До третьої групи належать найбільш досконалі навантажувальні пристрої, в яких енергія випробуваного двигуна практично повністю рекуперується в живильну електричну мережу [9]. Такі гальмівні пристрої характеризуються високими енергетичними показниками, простотою автоматизації технічного процесу обкатки і випробування двигунів і виконуються на сучасній елементній базі [9, 14-17, 24-27]. До них відносять навантажувальні пристрої типу «генератор - двигун», гальмівні пристрої, виконані за системою «машина постійного струму – тиристорний

перетворювач», навантажувальні пристрої на основі машини подвійного живлення і гальмівні пристрої типу «асинхронний двигун – перетворювач частоти».

Навантажують пристрої типу «асинхронний двигун – перетворювач частоти» є найдосконалішими в даний час [9]. Регулювання частоти обертання в режимі холодного обкатування і навантажувального моменту в режимі гарячої обкатки здійснюється за допомогою перетворювача частоти, що дозволяє змінювати вихідну частоту від 0 до 400 Гц [19, 24-27]. Розгін і гальмування асинхронного двигуна в таких установках здійснюється плавно, а при необхідності - по лінійної залежності від часу [9].

В даний час на українському ринку представлена велика кількість виробників перетворювачів частоти, в основному всі вони іноземні - азіатські (китайські, японські), європейські, американські та ін. [19, 24-27].

Найбільшою популярністю користується продукція таких виробників, як Siemens (перетворювачі Micromaster), Danfoss, Lenze. Серед американських виробників виділяють перетворювачі компанії General Electric, а серед азіатських - японські Mitsubishi Electric, Omron, Hitachi, Toshiba, корейські та тайванські LG Hyundai Electronics. Перетворювачі частоти випускає і Китай, однак китайські перетворювачі, на відміну від корейських, не відрізняються високою якістю. Є й вітчизняні виробники перетворювачів - ОВЕН і ін. [19, 24-27].

Перетворювачі частоти даних виробників, за конструктивними особливостям, можуть бути розбиті на два типи: двох ланкові перетворювачі частоти і безпосередні перетворювачі частоти [19]. Для побудови навантажувальних пристроїв стендів для обкатки ДВЗ можуть бути використані обидва типи перетворювачів [9], проте вибору оптимальної конструкції перетворювача частоти слід приділити першочергову увагу.

Серед достоїнств навантажувальних пристроїв на базі асинхронного двигуна з двох ланковим перетворювачем частоти, виконаному за схемою «активний випрямляч - автономний інвертор напруги», слід зазначити малі

масогабаритні параметри гальмівного електричного пристрою, простоту і надійність конструкції, високий ККД установки, широкий діапазон регулювання швидкості і моменту, можливість забезпечення режиму рекуперації гальмівної енергії в електричну мережу, простоту і високу точність управління, а також можливість повної оптимізації процесу обкатки ДВЗ за допомогою вбудованих в перетворювач промислових інтерфейсів. До недоліків даних гальмівних пристроїв слід віднести подвійне перетворення енергії, що незначно, але знижує коефіцієнт корисної дії установки.

Усунути цей недолік можливо застосувавши в конструкції обкатно-гальмівного стенду навантажувального пристрою на базі безпосереднього перетворювача частоти з асинхронним двигуном [9]. Такі пристрої силової електроніки прийнято розділяти на безпосередні перетворювачі частоти з природною і перетворювачі з примусовою комутацією.

Застосування перших в конструкції випробувальних стендів можливо, але є необґрунтованим з точки зору забезпечення швидкісних режимів обкатки ДВЗ, так як безпосередні перетворювачі частоти з природною комутацією дозволяють регулювати частоту, що підводиться до електричного двигуна напруги лише нижче від номінальної [20, 24-27], а, отже, вносяться значні обмеження в навантажувально-швидкісний режим роботи всього стенду. Застосування безпосередніх перетворювачів частоти з примусовою комутацією (матричних перетворювачів частоти) [20, 24-27] в конструкції навантажувального пристрою обкатно-гальмівного стенду дозволяють усунути цей недолік [9], однак, вартість таких перетворювачів значно перевищує номінальну вартість дволанкових перетворювачів, що пояснюється великою кількістю напівпровідникових приладів (діодів і транзисторів), необхідних на реалізацію даного типу перетворювача частоти.

На сьогоднішній день випробувальні стенди для обкатки ДВЗ, виконані з використанням навантажувальних пристроїв на базі матричних перетворювачів частоти, у виробництві відсутні.

Серед загальних недоліків випробувальних стендів ДВЗ, реалізованих з допомогою електричних навантажувальних пристроїв, також можна виділити високий рівень шуму, вібрацій і загазованості приміщень при проведенні гарячої обкатки, що обумовлює важкі умови праці обслуговуючого персоналу [10].

Існують також гальмівні стенди, на яких здійснюють холодну обкатку двигунів шляхом подачі повітря під тиском в циліндри ДВЗ [21], що дозволяє створювати додаткові навантаження в циліндрах і притерти ті ділянки, які необхідно підготувати до сприйняття експлуатаційних навантажень [21].

Важливо також зазначити, що спеціалізовані обкатні стенди випускаються для однотипних за номінальним потужностям і частотам обертання двигунів [21]. Дана особливість викликає необхідність на авторемонтних підприємствах мати до трьох типорозмірів стендів [2, 3, 6], що для малих ремонтних сервісів є недозвальною розкішшю. Тому підприємства, які не мають коштів на закупівлю такої кількості випробувальних стендів, відремонтовані двигуни обкатують шляхом холостий роботи і під навантаженням безпосередньо на машині. Іноді, при відсутності стендів, ДВЗ обкатують шляхом прокрутки від ведучих коліс машин під час їх буксирування, при цьому необхідні швидкісні режими підтримують шляхом зміни швидкості буксирування і номера передачі на коробці перемикачів передач [1, 5]. Можлива також холодна обкатка шляхом прокрутки вала двигуна через вал відбору потужності трактора, який карданним валом з'єднується з валом відбору потужності трактора [11].

Крім того, практична реалізація рекомендованих типовими і іншими технологіями швидкісних режимів холодної обкатки часто ускладнюється внаслідок обмеженого діапазону частот обертання серійних обкатних стендів, складових 300 ... 1500 об/хв. [1, 4-6, 13-18].

1.4 Обґрунтування необхідності стендової обкатки двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки

Відповідно до ДСТУ ISO 26322-2:2013 Сільськогосподарські та лісогосподарські трактори. Вимоги щодо безпеки. Трактори вузькоколіїні та малогабаритні (ISO 26322-2:2010, IDT) [22], ГОСТ 28523-90 «Мобільні засоби малої механізації сільськогосподарських робіт. Трактори малогабаритні. типи і основні параметри» [23] і наказом Держстандарту України від 30 липня 2002 м №64 «Про номенклатурі продукції і послуг (робіт), що підлягають обов'язковій сертифікації та Номенклатури продукції, відповідність якої може бути підтверджена декларацією про відповідність» під малогабаритною розуміється наступна техніка:

1. Трактори сільськогосподарські універсально-просапні малогабаритні потужністю до 16 кВт (до 22 к.с.);
2. Машини сільськогосподарські, що агрегуються з малогабаритними тракторами;
3. Інструмент, інвентар та засоби малої механізації садово-городні;
4. Машини та обладнання для бджільництва, шовківництва і захищеного ґрунту;
5. Автомобілі загального призначення бортові, шасі і фургони повної масою не більше 3,5 тонн.

Особливістю мобільних засобів малої механізації сільськогосподарських робіт є масогабаритні обмеження, які визначають наступні діапазони рівнів потужності таких засобів: переносні - 0,3 ... 3 кВт, пішохідні - 3 ... 10 кВт, мобільні - 10 ... 16 кВт, стаціонарні - 0,1 ... 10 кВт [28]. Їх застосовують на тих же агрофонах з тими ж сільськогосподарськими об'єктами, для яких призначена традиційна сільгосптехніка, і тому вони повинні відповідати основним агротехнічним вимогам по глибині обробітку ґрунту, висоті зрізу, якістю розпилу і ін. [29]. Малогабаритну

сільськогосподарську техніку укомплектовують двотактними і чотиритактними двигунами.

ГОСТ 28523-90 «Мобільні засоби малої механізації сільськогосподарських робіт. Трактори малогабаритні. Типи і основні параметри» [30] встановлює типи малогабаритних тракторів одноосьових (Мотоблоків) і двовісних, а також їх параметри. Типи малогабаритних тракторів і мотоблоків показані в таблиці 1.1.

На підставі проведеного нами аналізу дефектів малогабаритної сільськогосподарської техніки, що надійшли на гарантоване обслуговування, з'ясувалося, що найбільший відсоток несправностей доводиться на циліндропоршневу групу - 22% і руйнування підшипників кочення, встановлених на шатунній шийці колінчастого вала - 14%. На підставі аналізу причин відмов ми прийшли до висновку, що є необхідність введення передексплуатаційної обкатки всіх двигунів, що встановлюються на малогабаритну сільськогосподарську техніку. Крім того, різноманітність існуючих способів обкатки ДВЗ і неоднозначності думок наукової спільноти що до їх вибору, спонукають зайнятися вирішенням проблеми вибору оптимального способу обкатки для кожного двигуна індивідуально.

Таблиця 1.1

Типи малогабаритних тракторів і мотоблоків.

Тип	Маса, кг	Потужність двигуна, кг	Максимальна швидкість, км/год.	
			Робоча	Транспортна
МГТ двовісні				
Легкий	До 500	До 10	6	15
Середній	До 650	До 14	6	15
Важкий	Понад 650	Понад 14 до 16	6	15
МГТ одновісні (мотоблоки)				
Легкий	До 70	До 3	6	15 з причепом
Середній	До 100	До 5	6	15 з причепом
Важкий	Понад 100	Понад 5	6	15 з причепом

Також варто наголосити що практично повністю відсутні спеціальні стендів для обкатки ДВЗ малогабаритної сільськогосподарської техніки. Серед існуючих можна лише виділити стенд для проведення ресурсних і динамічних випробувань мотоблоків [31], що дозволяє проводити гарячу обкатку двигуна мотоблока. Даний стенд є морально застарілим і не відрізняється високою енергетичною ефективністю і здатністю забезпечити велике розмаїття існуючих технологій холодної та гарячої обкатки двигунів зважаючи на обмежений діапазон навантажувально-швидкісних режимів.

Відсутність на ринку спеціальних випробувальних стендів для обкатки ДВЗ малогабаритної сільськогосподарської техніки можна пояснити невисокою вартістю таких засобів та їх двигунів, а також неможливістю і недоцільністю адаптації існуючих обкатно-гальмівних стендів для обкатки двигунів МГТ через величезні енергетичні витрати, потужностей і вартості існуючих стендів [16-18].

Між тим, необхідно відзначити, що якісна обкатка дозволяє збільшити ресурс двигуна на 20-40% і продовжити термін його служби [1].

Тому розробка і вдосконалення технологій і технічних засобів для обкатки і випробування двигунів малогабаритних тракторів дозволить істотно підвищити ресурс як знову нових двигунів, так і капітально відремонтованих.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Обґрунтування оптимального способу регулювання навантажувально-швидкісними режимами роботи асинхронного двигуна випробувального стенду двигунів малогабаритних тракторів

В даний час існують різні способи регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна [14-21], засновані на зміні фізичних величин вираження, їх можна класифікувати відповідно до схеми, представленої на рисунку 2.1.

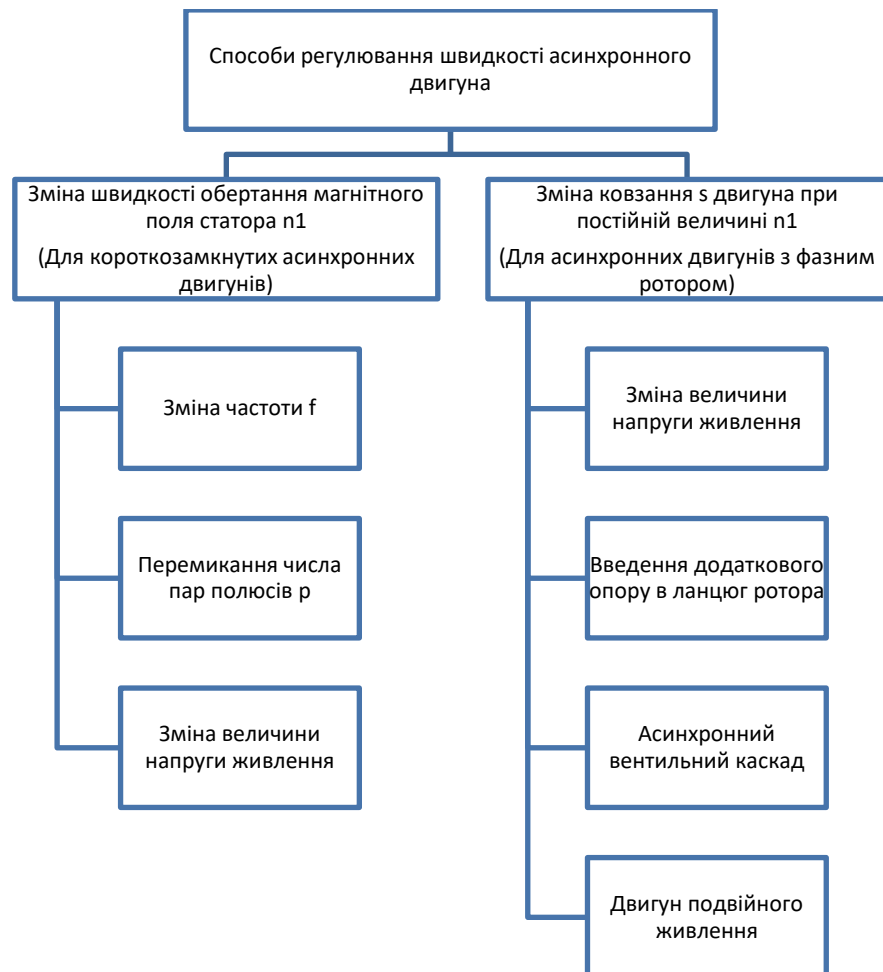


Рисунок 2.1 - Класифікаційна схема способів регулювання швидкості асинхронного двигуна.

Розглянуті способи регулювання швидкості асинхронного двигуна характеризуються різними показниками, такими як: діапазон регулювання,

плавність, економічність, стабільність швидкості, напрямок регулювання швидкості і допустиме навантаження при різних швидкостях обертання. Тому для вибору способу регулювання швидкістю обертання електричного двигуна випробувального стенду ДВЗ МГТ необхідно врахувати всі ці параметри.

Діапазон регулювання швидкості D визначається виразом:

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (2.1)$$

де n_{max} і n_{min} - максимальна і мінімальна швидкість обертання асинхронного двигуна, об/хв.

Діапазон регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна D повинен бути максимальним.

Плавність регулювання Π є стрибок швидкості при переході від діючої швидкості до найближчої можливої і визначається виразом:

$$\Pi = \frac{n_i}{n_{i-1}} \quad (2.2)$$

де n_i і n_{i-1} - швидкість на i -й ($i-1$) і $(i-1)$ -й щаблях регулювання, об/хв.

Плавність регулювання тим вище, чим менше цей стрибок. Число швидкостей z , одержуваних в даному діапазоні D , визначається плавністю регулювання Π , відповідно до наступної залежності:

$$D = \Pi^{z-1} \quad (2.3)$$

Існуючі способи обкатки ДВС мають на увазі як плавне, так і ступінчасту зміну швидкісних режимів. Тому для випробувального стенду двигунів МГТ повинні забезпечуватися як плавні режими зміни швидкостей, так і ступінчасті. У першому випадку коефіцієнт Π повинен прямувати до одиниці ($\Pi \rightarrow 1$) при числі швидкостей $z \rightarrow \infty$, а в другому коефіцієнт Π повинен істотно відрізнитися від одиниці.

Істотне значення мають втрати енергії в процесі регулювання. Так втрати потужності ΔP , що виникають в процесі регулювання швидкості, визначають ККД електричного приводу навантажувального пристрою випробувального стенду η :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \quad (2.4)$$

де P_2 і ΔP - потужність і втрати потужності на валу електричного двигуна випробувального стенду, Вт.

При роботі електричного двигуна стенда для обкатки та випробувань ДВР МГТ на різних швидкостях слід підраховувати середньозважений ККД за регульовальний цикл $\eta_{\text{ср}}$, що складається з m ступенів:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^m P_2 t_i}{\sum_2^m (P_{2i} + \Delta P_i) t_i} \quad (2.5)$$

де P_{2i} і ΔP_i - корисна потужність і втрати на i -й ступені, Вт; t_i - час, протягом якого електричний двигун працює на i -й ступені, с.

З виразу (2.5) видно, що за певних умов роботи електроприводу гальмівного стенду ККД за цикл $\eta_{\text{ср}}$ може виявитися значно вище ККД на якій-небудь одній ступені швидкості.

Втрати енергії при регулюванні швидкості електричного двигуна різні для різних способів управління.

Важливим економічним показником електроприводу випробувального стенду є коефіцієнт потужності та споживання реактивної енергії за робочий цикл. Знаючи споживані електричним двигуном активну $P_{\text{акт}}$ і реактивну $P_{\text{реак}}$ потужності можна визначити коефіцієнт потужності $\cos\varphi$:

$$\cos\varphi = \frac{P_{\text{акт}}}{\sqrt{P_{\text{акт}}^2 + P_{\text{реак}}^2}} \quad (2.6)$$

де $P_{\text{акт}}$ і $P_{\text{реак}}$ - активна і реактивна потужність, що споживаються електричним двигуном, Вт.

Середньозважений коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{\text{ср}}$ при роботі на різних швидкостях обертання з різним часом і з різними навантаженнями протягом циклу регулювання можна визначити відповідно до виразу:

$$\cos\varphi_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^m P_{\text{акт}i} t_i}{\sum_2^m \left(\sqrt{P_{\text{акт}i}^2 + P_{\text{реак}i}^2} \right) t_i} \quad (2.7)$$

де $P_{\text{акт}i}$ і $P_{\text{реак}i}$ - активна і реактивна потужності на i -й ступені, Вт; t_i - час, протягом якого електричний двигун працює на i -й ступені, с.

Номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ для більшості асинхронних двигунів становить 0,8 ... 0,9.

Стабільність швидкості регулювання електричного двигуна випробувального стенду характеризується зміною швидкості обертання ротора асинхронного двигуна n_2 при заданому відхиленні гальмівного моменту $M_{\text{гал}}$.

Допустиме навантаження електричного двигуна випробувального стенду при різних швидкостях обертання, тобто найбільше значення крутного моменту $M_{\text{кр}}$, який асинхронний двигун здатний розвивати довго при роботі на регульовальних характеристиках, визначається нагріванням даного двигуна і для різних способів регулювання є різною. Тому, для зменшення нагрівання, в випробувальних стендах двигунів МГТ доцільним буде використовувати в конструкції навантажувального пристрою асинхронний двигун з примусовою вентиляцією.

На підставі даних показників розглянемо способи регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, представлені на рисунку 2.1.

Регулювання швидкості асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором зміною числа пар полюсів p дозволяє отримувати кілька (від 2 до 4) значень робочих швидкостей, і вимагає застосування спеціальних модифікацій асинхронних двигунів, що володіють підвищеними масогабаритними і ціновими показниками [21]. Промислово випускається чотиришвидкісний асинхронний двигун АІР180М12 / 8/6/4, однак його параметри дозволяють отримати лише ступінчасте регулювання, а випробувальний стенд двигунів МГТ повинен забезпечувати як плавну, так і ступеневу зміну швидкості обертання, то даний спосіб регулювання не підходить для застосування в складі стенду для обкатки ДВС.

Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором можливо шляхом зміни частоти змінного струму в обмотці статора f , цей метод отримав назву частотного регулювання [20].

Серед його переваг виділяють: високий діапазон і плавність регулювання, економічність, низькі втрати в електричному двигуні, стабільність роботи приводу, а також можливість забезпечення рекуперативного гальмування до повної зупинки електричного двигуна [20, 21]. Для реалізації частотного управління необхідний спеціальний електронний пристрій - перетворювач частоти, який керує електричним двигуном, формуючи на виході електричну напругу з змінними амплітудою і частотою [20]. Для реалізації навантажувального пристрою випробувального стенду ДВС МГТ можуть бути використані як частотне, так і векторне управління швидкістю і моментом асинхронного двигуна. Частотне керування має низький діапазон зміни частоти 1/40, а векторний більш високий 1/100 (1/1000). Тому використання частотного регулювання є недоцільним. Системи векторного керування мають високий рівень точності при регулюванні швидкості обертання валу ($\pm 0,2\%$ з використанням датчика швидкості, $\pm 1,5\%$ без його використання) у всьому діапазоні регулювання, забезпечують обертання валу асинхронного двигуна на малих частотах плавно і без ривків, а також забезпечують швидке реагування на можливу зміну навантаження [20, 21].

Крім того, системи векторного керування забезпечують високий ККД електричного двигуна за рахунок зниження втрат через намагнічування і нагріву, а також підвищують термін служби всього електричного приводу [21, 26]. Дані особливості обґрунтовують доцільність застосування систем векторного бездатчикового управління асинхронним електроприводом в складі випробувального стенду ДВЗ МГТ.

2.2 Математична модель системи регулювання навантажувально-швидкісних режимів роботи асинхронного електроприводу

При скалярному методі регулювання швидкості асинхронного двигуна управління крутним моментом $M_{кр}$ здійснюється шляхом зміни

амплітуди і частоти вектора напруги або струму статора електричного двигуна [32-35].

Для побудови систем векторного керування асинхронним електроприводом випробувального стенду двигунів МГТ доцільно скористатися Т-подібною схемою заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором [33], представленої на рисунку 2.2.

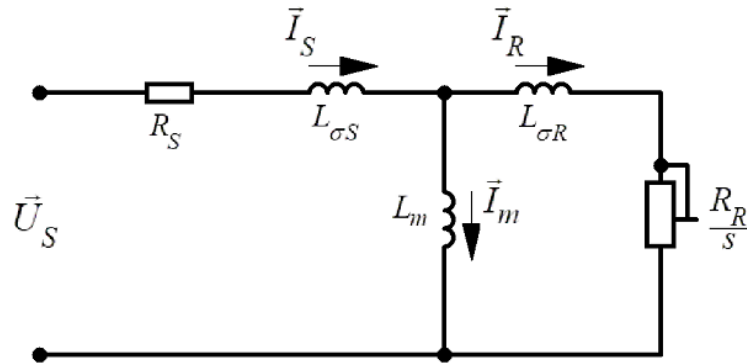


Рисунок 2.2 - Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

На схемі рисунка 2.2 введені наступні позначення: \vec{U}_S – узагальнений вектор вхідної напруги; \vec{I}_S - узагальнений вектор струму статора, підрозділяється на дві складові: \vec{I}_m - узагальнений вектор струму намагнічування, \vec{I}_R - узагальнений вектор струму ротора.

Величини і співвідношення струмів асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при заданій вхідній напрузі визначаються параметрами схеми заміщення рисунка 2.2: R_S - опір обмотки статора, характеризує втрати в статорних обмотках, Ом; $L_{\sigma S}$ – індуктивність розсіювання статора, що характеризує частину потоку статора зчеплену з ротором, Гн; L_m індуктивність намагнічування, Гн, що характеризує частину потоку, зчеплену зі статором і з ротором; $L_{\sigma R}$ - індуктивність розсіювання ротора, Гн, що характеризує частину потоку ротора не зчеплену зі статором; $\frac{R_S}{s}$ - параметр, що характеризує активні втрати в роторі, Ом; R_R - опір ротора в режимі короткого замикання, Ом; s - ковзання, яке визначається виразом

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\% \quad (2.8)$$

де n_1, n_2 - швидкість обертання магнітного поля статора, об/хв;

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором характеризується наступними векторами станів: \vec{U}_S - вектор вхідної напруги статора, В; \vec{I}_S - вектор струму статора, А; \vec{I}_m вектор струму намагнічування, А; \vec{I}_R - вектор струму ротора, А; $\vec{\psi}_S$ - вектор потокозчеплення статора, Вб; $\vec{\psi}_R$ - вектор потокозчеплення ротора, Вб; $\vec{\psi}_m$ - вектор потокозчеплення в повітряному зазорі (потік намагнічування), Вб [32-35].

Векторна діаграма асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в системі координат $\alpha\beta$, представлена на рисунку 2.3, відображає взаємозв'язки даних векторів і їх станів [35].

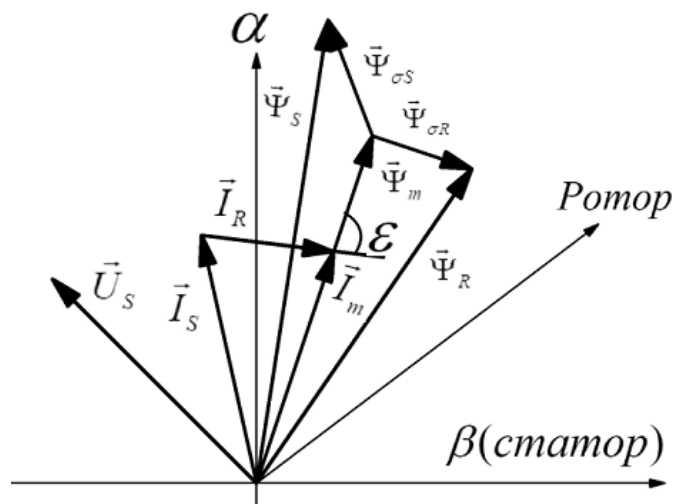


Рисунок 2.3 - Векторна діаграма асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в системі координат $\alpha\beta$.

З рисунка 2.3 видно, що під час роботи асинхронного двигуна всі вектори станів обертаються в площині поперечного перерізу електричного двигуна навколо осі обертання ротора.

Вектор струму намагнічування \vec{I}_m визначається виразом:

$$\vec{I}_m = \vec{I}_S + \vec{I}_R \quad (2.9)$$

де \vec{I}_S і \vec{I}_R - вектора струму статора і ротора асинхронного двигуна, А.

Вектор потокосцеплення статора $\vec{\psi}_S$ визначається виразом:

$$\vec{\psi}_S = \vec{\psi}_m + \vec{\psi}_{\sigma S} \quad (2.10)$$

де $\vec{\psi}_m$ і $\vec{\psi}_{\sigma S}$ - вектора потокосцеплення в повітряному зазорі (потік намагнічування) і потоку розсіювання статора, Вб.

Потік розсіювання статора $\vec{\psi}_{\sigma S}$ визначається виразом:

$$\vec{\psi}_{\sigma S} = L_{\sigma S} \vec{I}_S \quad (2.11)$$

де $L_{\sigma S}$ - індуктивність розсіювання статора, Гн; \vec{I}_S - вектор струму статора, А.

Вектор потокосцеплення ротора $\vec{\psi}_R$ визначається виразом:

$$\vec{\psi}_R = \vec{\psi}_m + \vec{\psi}_{\sigma R} \quad (2.12)$$

де $\vec{\psi}_m$ і $\vec{\psi}_{\sigma R}$ - вектора потокосцеплення в повітряному зазорі (потік намагнічування) і потоку розсіювання ротора, Вб.

Потік розсіювання ротора $\vec{\psi}_{\sigma R}$ визначається виразом:

$$\vec{\psi}_{\sigma R} = L_{\sigma R} \vec{I}_R \quad (2.13)$$

де $L_{\sigma R}$ - індуктивність розсіювання ротора, Гн; \vec{I}_R - вектор струму ротора, А.

Потік намагнічування $\vec{\psi}_m$ визначається виразом:

$$\vec{\psi}_m = L_m \vec{I}_m \quad (2.14)$$

де L_m - індуктивність намагнічування, Гн; \vec{I}_m - вектор струму намагнічування, А.

Індуктивність статора асинхронного двигуна визначається згідно виразу:

$$L_S = L_m + L_{\sigma S} \quad (2.15)$$

Індуктивність ротора:

$$L_R = L_m + L_{\sigma R} \quad (2.16)$$

Використовуючи вирази (2.9) - (2.16) отримаємо такі вирази для потоків асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором:

$$\begin{cases} \vec{\psi}_m = L_m \vec{I}_S + L_m \vec{I}_R \\ \vec{\psi}_S = L_S \vec{I}_S + L_m \vec{I}_R \\ \vec{\psi}_R = L_R \vec{I}_R + L_m \vec{I}_S \end{cases} \quad (2.17)$$

Крутний момент, (електромагнітний) момент асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором $M_{кр}$ виникає внаслідок взаємодії струму ротора \vec{I}_R з потокозчеплення в повітряному проміжку $\vec{\psi}_m$ і визначається згідно виразу:

$$\vec{M}_{кр} = \frac{3}{2} p \vec{I}_R \vec{\psi}_m \quad (2.18)$$

Напруга котушки індуктивності:

$$\vec{U}_S = \left(\frac{d\vec{\psi}_S}{dt} \right)_{\alpha\beta} + \vec{I}_S R_S = \left(\frac{d\vec{\psi}_S}{dt} \right)_{XY} - \left(\frac{d\vec{\psi}_S}{dt} \right)_{\omega_k} + \vec{I}_S R_S \quad (2.19)$$

Вираз (2.19) являє собою рівняння рівноваги статора асинхронного двигуна в системі координат XY [34, 35].

Для побудови системи регулювання в двофазній обертається системі координат dq , вісь d якої орієнтована по потокозчеплення ротора ψ_R , запишемо такі вирази [34]: $\psi_{Rq} = 0$; $\omega_k = \omega$ - швидкість обертання поля; $\omega_k - \omega_R = \Delta\omega$ - швидкість ковзання ротора асинхронного двигуна.

Перепишемо рівняння обертального моменту асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором $M_{кр}$ (2.18) в системі координат dq з урахуванням $\psi_R = const$:

$$\vec{M}_{кр} = \frac{3}{2} p I_{Rq} \psi_{md} = \frac{3}{2} p I_{Rq} \psi_R \quad (2.20)$$

Діаграма векторів станів асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в даному випадку буде мати вигляд, представлений на рисунку 2.4.

Швидкість ковзання $\Delta\omega$ (без урахування знака) [35]:

$$\Delta\omega = \frac{|I_R| R_R}{\psi_R} \quad (2.21)$$

Висловивши з виразу (2.21) I_R і підставивши у вираз крутного моменту (2.20), отримаємо:

$$M_{кр} = \frac{3}{2} p \Delta\omega \frac{\psi_R^2}{R_R} \quad (2.22)$$

З виразу (2.23) отримаємо залежність ковзання $\Delta\omega$ (рад/с) від крутного моменту $M_{кр}$:

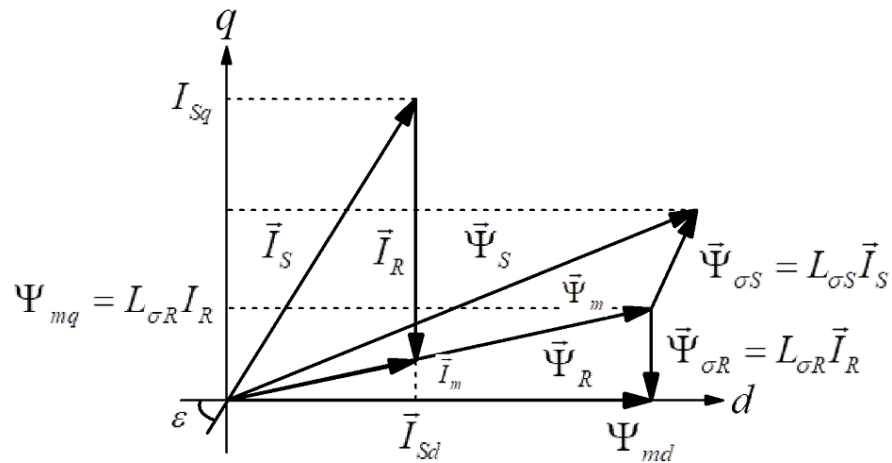


Рисунок 2.4 - Діаграма векторів станів асинхронного двигуна в системі координат dq при $\psi_R = const$.

$$\Delta\omega = \frac{2M_{кр}R_R}{3p\psi_R^2} \quad (2.23)$$

Вираз потокощеплення в повітряному зазорі ψ_m в залежності від крутного моменту $M_{кр}$, при заданому значення потокощеплення ротора ψ_R :

$$\psi_m = \sqrt{\psi_R^2 + \left(\frac{2M_{кр}L_{\sigma R}}{3p\psi_R}\right)^2} \quad (2.24)$$

Струм намагнічування I_m пов'язаний з потокощеплення в повітряному проміжку ψ_m . Так як потокощеплення в повітряному проміжку ψ_m утворюється множенням струму намагнічування I_m на індуктивність намагнічування L_m , то внаслідок насичення магнітного кола електричного двигуна, його індуктивність намагнічування L_m є функцією струму намагнічування I_m . Крива залежності даних величин представлена на малюнку 2.5.

Знаючи потокощеплення в повітряному проміжку ψ_m , можна знайти струм намагнічування I_m на будь-якій ділянці кривої намагнічування:

$$I_m = \frac{\psi_m - a_i}{b_i} \quad (2.25)$$

При роботі на лінійній ділянці кривої намагнічування I_{sd} , при $a_0=0$:

$$I_{sd} = \frac{\psi_R}{L_0} \quad (2.26)$$

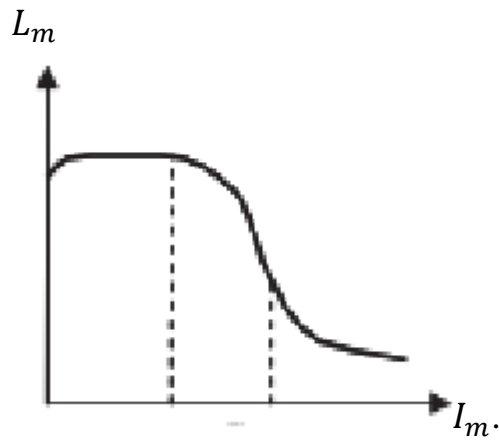


Рисунок 2.5 - Крива залежності індуктивності намагнічування L_m від струму намагнічування I_m . асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

де $b_0 = L_0 = const$ - величина індуктивності намагнічування на лінійній ділянці, Гн.

Таким чином, вирази (2.24) і (2.26) визначається проекцію статорного струму на вісь d I_{sd} . На лінійній ділянці кривої намагнічування дана складова не залежить від крутного моменту $M_{кр}$ і є чисто намагнічуючою, а на нелінійній ділянці дана складова є намагнічуючою і досить слабо залежить від крутного моменту $M_{кр}$ через потокощеплення в повітряному зазорі ψ_m .

Підставивши значення I_R в рівняння обертального моменту асинхронного двигуна (2.22), отримаємо:

$$M_{кр} = \frac{3}{2} p I_R \psi_R = \frac{3p I_{sq} \psi_R^2}{2(L_{\sigma R} I_{sd} + \psi_R)} \quad (2.27)$$

Виділивши з виразу (2.27) проекцію струму статора на вісь q I_{sq} отримаємо такий вираз:

$$I_{sq} = \frac{2M_{кр}(L_{\sigma R} I_{sd} + \psi_R)}{3p \psi_R^2} \quad (2.28)$$

Вибір потокощеплення ротора асинхронного двигуна тісно пов'язаний з поняттям енергетичної ефективності роботи електричного двигуна, так як електричні машини зазвичай проектуються з урахуванням оптимізації ККД в

номінальній точці [35]. В якості критерію оптимізації можна прийняти критерій мінімуму струму статора асинхронного двигуна, що забезпечить мінімальні втрати [32-35].

Беручи відомі параметри схеми заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором і зовнішній вигляд кривої намагнічування, що має кусочно-лінійну апроксимацію, можна задатися різними значеннями потокозчеплення ротора ψ_R при призначеному номінальному обертальному моменту і зробити обчислення за формулами (2.24, (2.28).

Після обчислень по вищеписаним формулами, проводиться обчислення струму статора асинхронного двигуна I_S :

$$I_S = \sqrt{I_{Sd}^2 + I_{Sq}^2} \quad (2.29)$$

За результатами отриманих обчислень вибирається потокозчеплення ротора ψ_R , відповідне мінімуму струму статора I_S асинхронного двигуна.

Управління моментом $M_{кр}$ асинхронного двигуна випробувального стенду двигунів МГТ може здійснюватися шляхом регулювання складових струму статора, а управління складовими струму статора I_{Sd} і I_{Sq} здійснюється за допомогою зформованого регуляторами струму складових напруги статора в системі координат dq .

Визначимо потокозчеплення в рівняннях рівноваги статора асинхронного двигуна через струми, в результаті чого отримаємо:

$$\psi_{Sd} = \psi_{md} + L_{\sigma S} I_{Sd} = L_m I_{Sd} + L_{\sigma S} I_{Sd} \quad (2.30)$$

$$\psi_{Sq} = \psi_{mq} + L_{\sigma S} I_{Sq} = c + L_{\sigma S} I_{Sq} \quad (2.31)$$

$$I_{mq} = \frac{L_{\sigma R} I_R I_{Sd}}{\psi_R} \quad (2.32)$$

$$I_R = \frac{I_{Sq} \psi_R}{L_{\sigma R} I_{Sd} + \psi_R} \quad (2.33)$$

Так як $\begin{cases} \psi_{md} = c \\ I_{md} = I_{Sd} \\ \psi_{mq} = L_m I_{mq} \end{cases}$, то проекція струму статора на вісь d I_{Sd} може

бути визначена як:

$$I_{Sd} = \frac{I_{Sd}}{L_m} \quad (2.34)$$

Підставами вираз (2.33) в (2.32), а потім, підставивши туди (2.34), отримаємо:

$$I_{mq} = I_{Sq} \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma R} + L_m} \quad (2.35)$$

Підставивши вираз (2.35) в (2.31), отримаємо:

$$\psi_{Sq} = \left(L_{\sigma S} + \frac{L_m L_{\sigma R}}{L_{\sigma R} + L_m} \right) \quad (2.36)$$

На основі отриманих виразів запишемо рівняння рівноваги статора асинхронного двигуна:

$$\begin{cases} U_{Sd} = (L_m + L_{\sigma S}) \frac{dI_{Sd}}{dt} + R_S I_{Sd} - \omega \left(L_{\sigma S} + \frac{L_m L_{\sigma R}}{L_m + L_{\sigma R}} \right) I_{Sq} \\ U_{Sq} = \left(L_{\sigma S} + \frac{L_m L_{\sigma R}}{L_m + L_{\sigma R}} \right) \frac{dI_{Sq}}{dt} + R_S I_{Sq} - \omega (L_{\sigma S} + L_m) I_{Sd} \end{cases} \quad (2.37)$$

З рівнянь (2.37) видно, що в напрузі U_{Sd} присутня складова, що залежить від I_{Sq} , а в напрузі U_{Sq} - складова, що залежить від I_{Sd} . Отже, при синтезі системи векторного керування асинхронним електроприводом випробувального стенду ДВЗ МГТ між каналами регулювання складових I_{Sd} і I_{Sq} буде існувати взаємовплив, тобто канали регулювання матимуть один на одного збуджуючий вплив, що помітно проявляються в перехідних процесах.

Ці перехресні зв'язки між каналами регулювання можна виключити, компенсавши їх [35].

Компенсаційна складова каналу регулювання I_{Sd} :

$$U_{kd} = -\omega I_{Sq} \left(L_{\sigma S} + \frac{L_m L_{\sigma R}}{L_m + L_{\sigma R}} \right) \quad (2.38)$$

Компенсаційна складова каналу регулювання I_{Sq} :

$$U_{kd} = -\omega I_{Sq} (L_{\sigma S} + L_{\sigma S}) \quad (2.39)$$

Як струми для обчислення даних складових необхідно використовувати виміряні і перетворені в систему координат dq сигнали з датчиків струму фаз [31].

Для компенсації (виключення) перехресних зв'язків складові виразів (2.38) і (2.39) необхідно підсумовувати з одержуваними на виході регуляторів струму складовими векторів напруги статора.

При роботі на номінальній напрузі з підвищенням частоти амплітуда струму статора обмежується зростанням індуктивного опору асинхронного двигуна [32]. Отже, зі зростанням частоти обмежується і гранично досяжний крутний момент електричного двигуна.

Максимальний крутний момент $M_{кр.мах}$, який асинхронний двигун здатний забезпечити залежить від частоти і визначається відповідно до наступного виразу [35]:

$$M_{кр.мах} = M_{кр.ном} \frac{\omega_{ном}}{\omega} \quad (2.40)$$

де $M_{кр.ном}$ і $\omega_{ном}$ - номінальні крутний момент і швидкість обертання асинхронного двигуна.

Співвідношення (2.40) виходить з припущення про збереження механічної потужності при роботі асинхронного двигуна на різних швидкостях [35]:

$$P = M\omega = const \quad (2.41)$$

Вираз (2.41) не є абсолютно справедливим, так як на різних частотах обертання електричного двигуна втрати в ньому різні, а, отже, потужність не зберігається [31]. Однак, в першому наближенні вираз (2.41) можна вважати вірним.

Струм перетворювача частоти завжди обмежений граничним значенням $I_{пч.гр}$, пов'язаним з його фізичної реалізацією [19-20], знаючи потокощеплення ротора ψ_R і $I_{пч.гр}$, можна, використовуючи вираз (2.28), обчислити перевантажувальний момент $M_{пер}$:

$$M_{пер} = \frac{3p\psi_R^2 \sqrt{I_{пч.гр}^2 - I_{sd}^2}}{2(L_{\sigma R} I_{sd} + \psi_R)} \quad (2.42)$$

Частота, нижче якої починається обмеження крутного моменту асинхронного двигуна на рівні перевантажувального, визначається виразом:

$$\omega_{\text{пер}} = \omega_{\text{ном}} \frac{M_{\text{кр.ном}}}{M_{\text{пер}}} \quad (2.43)$$

При побудові системи регулювання швидкості асинхронного електроприводу випробувального стенду ДВЗ МГТ необхідно враховувати обмеження крутного моменту, описані даними виразами.

Представлена математична модель лежить в основі проекрованої системи векторного бездатчикового регулювання навантажувально-швидкісних режимів роботи асинхронного електроприводу випробувального стенду двигунів малогабаритних тракторів, і дозволяє підвищити точність регулювання швидкості і навантажувального моменту обкатно-гальмівного стенду без використання датчиків зворотного зв'язку за рахунок оптимального поєднання взаємозв'язків електричних параметрів, використовуваних в процесі управління швидкістю і моментом асинхронного двигуна.

2.3 Побудова системи регулювання навантажувально-швидкісними режимами роботи асинхронного електроприводу випробувального стенду двигунів малогабаритних тракторів

Керуючись описаними вище рівняннями і залежностями, побудуємо структурну схему системи векторного регулювання навантажувально-швидкісними режимами роботи асинхронного електроприводу випробувального стенду двигунів малогабаритних тракторів (рисунок 2.6).

З малюнка 2.6 видно, що для управління швидкістю асинхронного електроприводу випробувального стенду ДВЗ МГТ необхідно змінювати крутний момент $M_{\text{кр}}$, тому система регулювання містить регулятор швидкості, що задає обертовий момент $M_{\text{кр}}$ і структуру, що забезпечує його відпрацювання. На рисунку 2.6 обертовий момент $M_{\text{кр}}$ електричного двигуна змінюється за допомогою управління струмом статора (вектором струму статора).

Крутний момент $M_{кр}$ асинхронного двигуна пов'язаний зі струмом статора по вищеписаним співвідношенням.

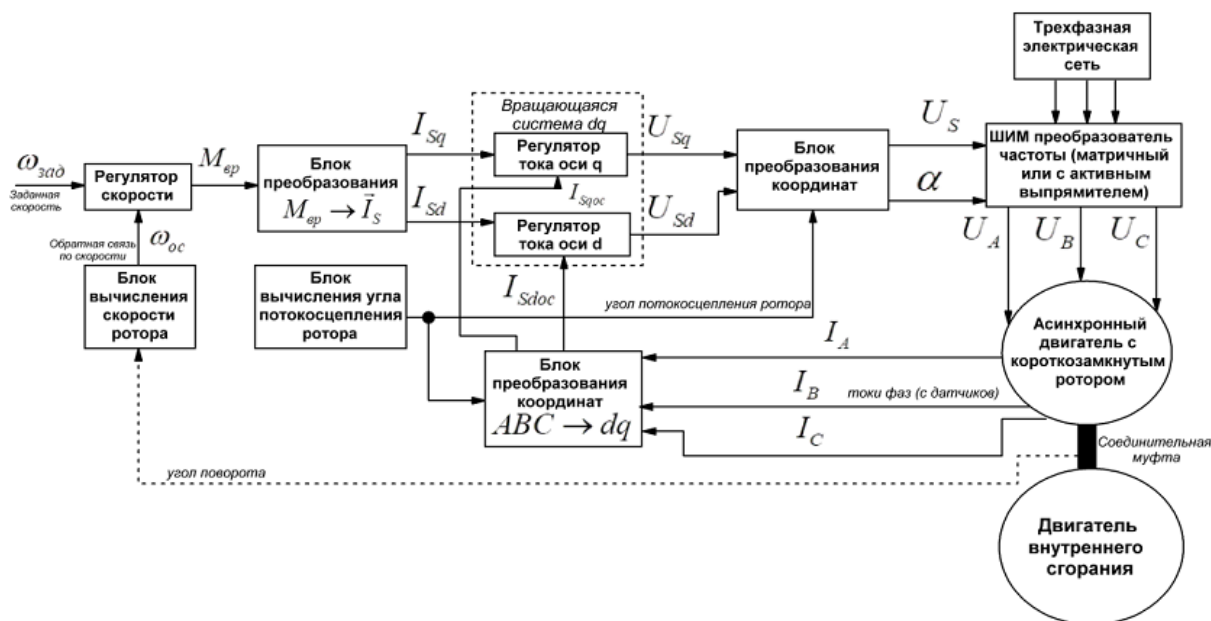


Рисунок 2.6 - Структурна схема системи регулювання навантажувально-швидкісних режимів роботи асинхронного електроприводу випробувального стенду ДВЗ МГТ.

Регулятор струму, що працює в обертовій системі координат dq , складається з двох скалярних регуляторів d і q проєкцій вектора і використовує в якості зв'язку виміряний і перетворений в систему dq реальний вектор струму статора. Регулятор струму формує в системі координат dq вектор напруги статора, що характеризується двома складовими U_{sd} і U_{sq} , а потім за допомогою блоку перетворень вектор напруги статора перекладається в нерухому систему координат, пов'язану зі статором, де в подальшому і реалізується. Реалізація вектора напруги статора здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Розглянемо докладніше систему регулювання навантажувально-швидкісних режимів асинхронного електроприводу випробувального стенду ДВЗ МГТ. Для цього побудуємо функціональну схему такої системи (рисунок 2.7).

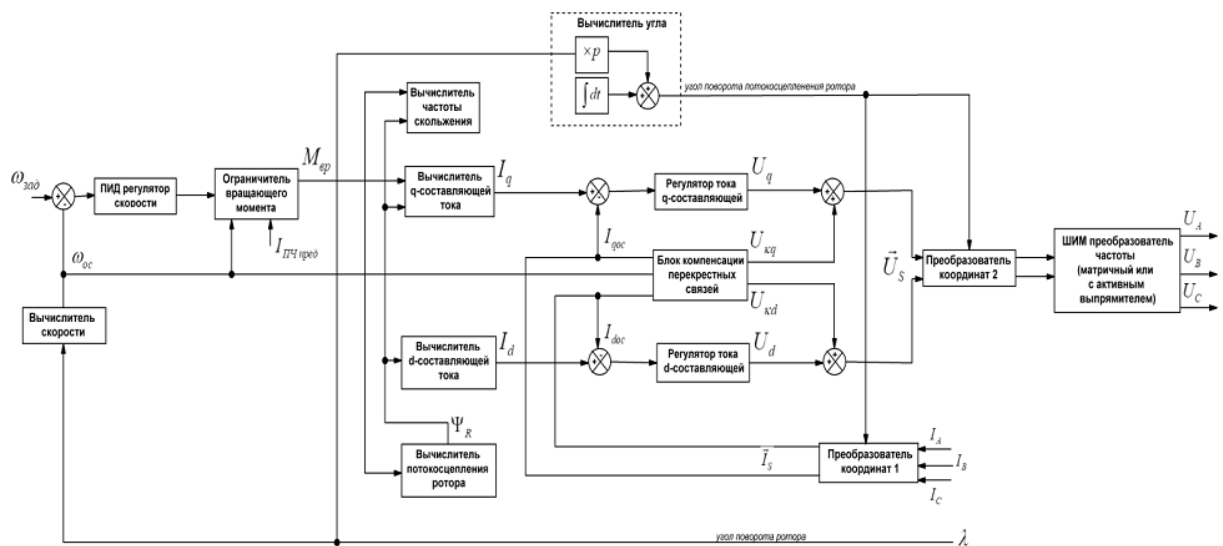


Рисунок 2.7 - Функціональна схема системи регулювання навантажувально-швидкісних режимів роботи асинхронного електроприводу випробувального стенду ДВЗ МГТ.

Функціональна схема рисунок 2.7 складається з наступних блоків:

- Блок «обчислювач швидкості» здійснює оцінку реальної швидкості по математичній моделі непрямим методом;
- Блок «ПД регулятор швидкості» виробляє з сигналу похибки по швидкості сигнал завдання крутного моменту $M_{кр}$;
- Блок «Обмежувач крутного моменту» обмежує крутний момент в залежності від частоти обертання асинхронного двигуна випробувального стенду ДВЗ МГТ, використовуючи вирази;
- Блок «Обчислювач частоти ковзання» виконує обчислення частоти ковзання $\Delta\omega$, використовуючи вираз;
- Блок «Обчислювач q - складової струму» виконує обчислення q складової струму статора I_{sq} ;
- Блок «Обчислювач d - складової струму» виконує обчислення d складової струму статора I_{sd} ;
- Блок «Обчислювач потокозчеплення ротора» виконує функцію оптимізації потокозчеплення ротора ψ_R в залежності від крутного моменту $M_{кр}$;

- Блок «Регулятор струму d - складової» являє собою пропорційний (П-регулятор) або пропорційно-інтегральний (ПІ-регулятор) регулятор, що формує з сигналу помилки по току сигнал завдання напруги по осі d U_d ;

- Блок «Регулятор струму q - складової» являє собою П-регулятор або ПІ-регулятор, що формує з сигналу помилки по току сигнал завдання напруги по осі q U_q ;

- Блок «Обчислювач кута» здійснює обчислення поточного кута повороту потокозчеплення ротора φ , відповідно до наступної залежності:

$$\varphi = p\lambda + \int \Delta\omega dt \quad (2.44)$$

де p, λ і $\Delta\omega$ - число пар полюсів, кут повороту ротора і частота ковзання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором;

- Блок «Блок компенсації перехресних зв'язків» обчислює напругу компенсації перехресних зв'язків. У ньому струми координат регулюються за допомогою сформованих в блоках «Регулятор струму d - складової» і «Регулятор струму q - складової» напруг координат U_d і U_q . Регулювання I_q викликає рівноважний вплив в каналі регулювання I_d , а, отже, регулювання I_d викликає обурення в каналі регулювання I_q . Схема компенсації перехресних зв'язків, показана на рисунку 2.7, дозволяє уникнути цих взаємних збурень, що покращує якість регулювання швидкості асинхронного електроприводу випробувального стенду ДВЗ МГТ. Блоки «Регулятор струму d - складової» і «Регулятор струму q - складової» формують складову напругу статора, що залежить тільки від струму регульованої координати U_d або U_q , а складова, що залежить від іншої (ортогональної) складової струму U_{kd} або U_{kq} , додається в напругу координати безпосередньо;

- Блок «Перетворювач координат 1» здійснює переклад струму статора з трифазної нерухомої системи координат в двофазну, а потім у обертову систему координат dq ;

- Блок «Перетворювач координат 2» здійснює переклад вектора напруги статора \vec{U}_s з обертової системи координат dq в нерухому двохфазну, а потім в полярну систему координат;

- Блок «ШІМ перетворювач частоти (матричний або з активним випрямлячем)» здійснює реалізацію вектора напруги статора.

Вже згадана система векторного регулювання швидкості асинхронного електроприводу випробувального стенду може бути реалізована в програмованих мікроконтролерах типу Arduino MEGA.

Запропонована схема може бути застосована при розробці системи регулювання навантажувально-швидкісних режимів роботи асинхронного електроприводу випробувального стенду ДВЗ МГТ. Їх застосування дозволить істотно знизити витрати на проектування стенда за рахунок зниження вартості перетворювача частоти, необхідного для регулювання швидкості асинхронного електродвигуна. Однак, робота випробувального стенду ДВЗ МГТ передбачає високу енергетичну ефективність за рахунок рекуперації гальмівної енергії в режимі гарячої обкатки в промислову електричну мережу, а перетворювачі частоти, використовувані для цієї мети, повинні відповідати вимогам українських і міжнародних стандартів щодо забезпечення електромагнітної сумісності, електробезпеки. Тому в складі стендів ДВЗ МГТ доцільно використовувати промислові перетворювачі частоти, а для реалізації даного способу регулювання швидкості асинхронного двигуна досить внесення в пам'ять цифрового контролера напівпровідникового перетворювача керуючих параметрів і математичної моделі використовуваного електродвигуна, описаної в цьому розділі магістерської роботи.

3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Стенд для обкатки і випробування двигунів малогабаритних тракторів

Конструктивний варіант електричного випробувального стенду двигунів МГТ представлений на рисунку 3.1.

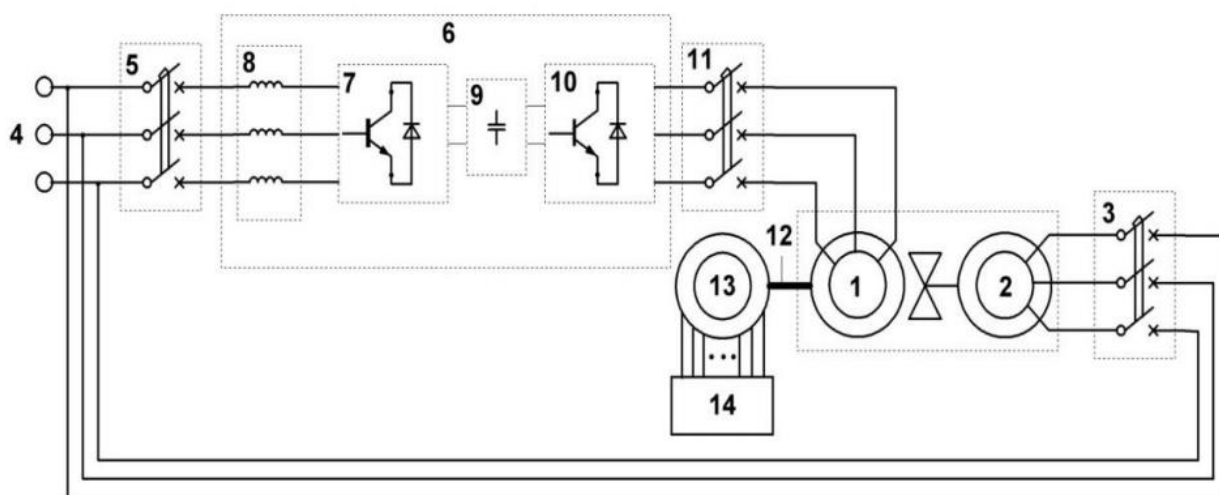


Рисунок 3.1 - Функціональна схема стенду для обкатки та випробувань ДВЗ МГТ (див. Позиції в тексті).

Стенд, представлений на рисунку 3.1, містить в своєму складі асинхронний короткозамкнений двигун 1 з вбудованою системою незалежного охолодження 2, підключеною, за допомогою трифазного автоматичного вимикача 3, до електричної мережі 4, що живиться через автоматичний вимикач 5 рекуперативний перетворювач частоти 6, що складається з активного транзисторного випрямляча 7, на вході якого встановлені входні дроселі 8, а на виході через ланку постійного струму 9, підключеної до транзисторного інвертору напруги 10, живить, в свою чергу, за допомогою включення через автоматичний вимикач 11, асинхронний короткозамкнений електродвигун 1, з'єднаний через муфту 12 з ДВЗ 13 на якому встановлені датчики 14, необхідні для контролю і вимірювання параметрів при різного роду випробування.

Робота випробувального стенду відбувається наступним чином. Включенням автоматичного вимикача 5 запускає рекуперативний перетворювач частоти 6, в якому на активний транзисторний випрямляч 7 і транзисторний інвертор напруги 10 подається керуючий сигнал і здійснюються значення необхідного вхідного струму і вихідної напруги рекуперативного перетворювача частоти 6, виходячи з необхідної швидкості обертання асинхронного короткозамкнутого двигуна 1.

Включенням автоматичного вимикача 11 дозволяється запуск асинхронного короткозамкнутого двигуна 1. Потім проводиться регулювання частоти його обертання згідно векторного бездатчикового способу регулювання [9, 14-15], детально описаного у другому розділі даної роботи. При роботі асинхронного короткозамкнутого двигуна 1 обертовий момент ротора утворює реактивний момент на статорі, який прагне повернути двигун в зворотному напрямку. Так як реактивний момент на статорі дорівнює обертовому моменту ротора, то по ньому датчиками 14 здійснюється фіксація гальмівного моменту ДВЗ 13.

Асинхронний короткозамкнений двигун 1 працює на електричному обкатному-гальмівному стенді в двох режимах: руховому і генераторному.

Перший режим роботи асинхронного короткозамкнутого двигуна 1 характерний для холодної обкатки ДВЗ 13, а другий - для гарячої обкатки ДВЗ 13. В режимі гарячої обкатки стенд переходить, як тільки частота обертання асинхронного короткозамкнутого двигуна 1 стає вище синхронної, що відбувається за рахунок обертання ДВЗ 13. У даному режимі велика частина механічної енергії ДВЗ 13 перетворюється в електричну, і, пройшовши, через вхідні дроселі 8, повертається назад в електричну мережу 4.

Автоматичний вимикач 3 запускає систему незалежного охолодження 2 асинхронного короткозамкнутого двигуна 1. Дана система обертається з частотою живлення електричної мережі 4 і використовується як вентилятора, що охолоджує обмотки асинхронного двигуна 1.

3.2 Експериментальне обладнання стенду для обкатки та випробувань двигунів малогабаритних тракторів

Запропонована конструкція стенда для обкатки і випробування двигунів МГТ, представлена на рисунку 3.1, дана схема може бути реалізована за допомогою промислово-устаткування, і комплектуючих.

Моделювання запропонованої конструкції стенда для обкатки і випробування двигунів МГТ ми проводитимемо за допомогою комп'ютерного програмного забезпечення, а саме програми MATLAB Simulink, та представленої в 2 розділі математичної моделі, для цього необхідно провести вибір промислового обладнання майбутнього стенду, це дасть можливість отримати дані для коректного моделювання.

Розглянемо докладніше обладнання стенду для обкатки та випробувань ДВЗ МГТ підбраного за семою рисунок 3.1.

Напруга живлення стенду 380В підведена до автоматичного вимикача ІЕК ВА47-29 С32 3. Основним елементом випробувального стенду є навантажує пристрій, виконаний по конструкції «асинхронний двигун - перетворювач частоти». В якості електричного двигуна використовується асинхронний короткозамкнений двигун з примусовою вентиляцією ДАР 112 М4 буз-ІМ1081-ІТ02500-В виробництва ТОВ «ЕЛРЕ» Зовнішній вигляд електричного двигуна представлений на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 - Асинхронний короткозамкнений двигун з примусовою вентиляцією ДАР 112 М4 буз-ІМ1081-ІТ02500-В.

Він має такі параметри: потужність N 5,5 кВт; частота обертання вала двигуна n 1440 об/хв.; $\cos\varphi = 0,82$; ККД 85%; Робоча частота 50 Гц., напруга живлення в залежності від схеми підключення 220-380 В.

Обмотки статора асинхронного двигуна з'єднуються за схемою «зірка» і підключаються до перетворювача частоти Mitsubishi FR-A741-5,5К, що представляє собою дволанковий перетворювач частоти, виконаний за конструкцією «активний випрямляч - автономний інвертор напруги», живиться від трифазної електричної мережі через автоматичний вимикач ІЕК ВА47-29 С25 Зр.

Перетворювач частоти Mitsubishi FR-A741-5,5К налаштовується в режим векторного бездатчикового управління швидкістю і обертовим моментом асинхронного короткозамкнутого двигуна і здійснює регулювання частоти обертання електродвигуна в режимі холодного обкатування і крутного моменту в режимі гарячої обкатки ДВЗ МГТ. У першому випадку електродвигун ДАР 112 М4 буз-ІМ1081-ІТ02500-В працює в робочому режимі, а в другому - в генераторному. Конструкція перетворювача частоти дозволяє безперешкодно повертати гальмівну енергію, отриману в процесі обкатки та випробувань ДВЗ, в електричну мережу без допомоги додаткових пристроїв.

Крім того, в алгоритм управління перетворювачем частоти вводиться функція компенсації ковзання і заноситься детальна математична модель асинхронного короткозамкнутого двигуна ДАР 112 М4 буз-ІМ1081-ІТ02500-В з розрахованими параметрами. Це дозволяє більш точно описати об'єкт управління та підвищити точність вимірювання параметрів випробувального стенду ДВЗ МГТ за допомогою математичного апарату, реалізованого в перетворювачі частоти Mitsubishi FR-A741-5,5К.

Зовнішній вигляд перетворювача частоти Mitsubishi FR-A741-5,5К представлений на рисунку 3.3.

Перетворювач частоти Mitsubishi FR-A741-5,5К оснащений панеллю управління FR-DU07, представленою на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 - Перетворювач частоти Mitsubishi FR-A741-5,5К.

Панель FR-DU07 використовується для налаштування параметрів перетворювача частоти, завдання швидкості або моменту обертання електричного двигуна, а також для індикації вимірюваних параметрів. Як індикаторні параметри можуть відображатися вихідна частота, вихідний струм, вихідна напруга, сигнали тривоги, уставка частоти, швидкість обертання, крутний момент і потужність на валу двигуна, а також ряд інших параметрів, детально описаних в технічній документації перетворювача частоти Mitsubishi FR-A741-5,5К.

Індикація вимірюваних і заданих параметрів перетворювача частоти Mitsubishi FR-A741-5,5К можлива за допомогою програмного забезпечення фірми Mitsubishi Electric - FR-Configurator, що дозволяє в режимі реального часу оцінювати і задавати параметри системи, а також виводити вимірювані параметри на персональний комп'ютер. Зовнішній вигляд оболонки FR-Configurator представлений на рисунку 3.4.

В якості досліджуваного обрано дизельний двигун GREENFIELD GF178 F, який представляє собою чотиритактний, одноциліндровий двигун з повітряним охолодженням і верхнім розташуванням клапанів і призначений, головним чином, для установки на малогабаритну сільськогосподарську техніку (мотопомпи, культиватори, мотоблоки, мінітрактори) потужністю до 5,2 к.с. Даний дизель оснащений системою легкого старту, ручним стартером і захистом по низькому рівню масла в картері.

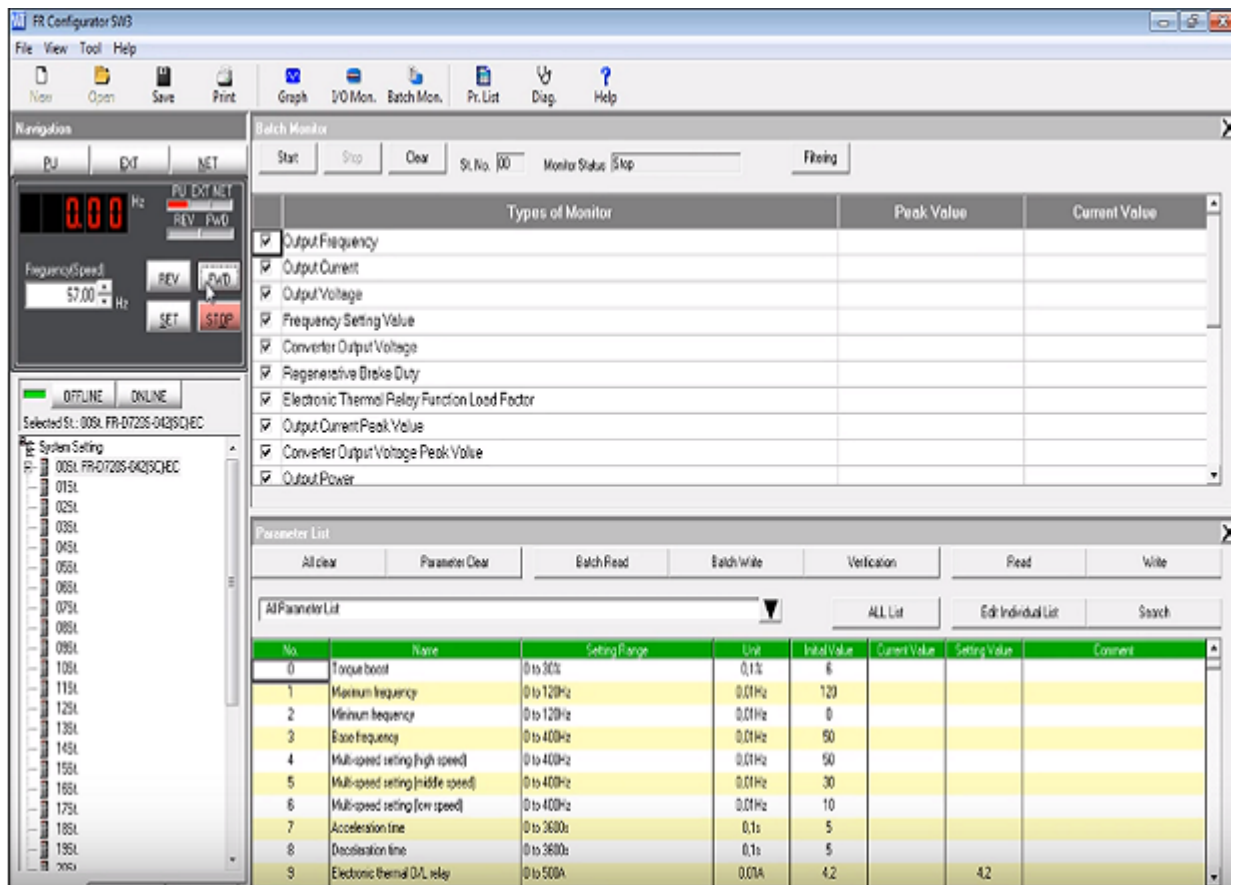


Рисунок 3.4 - Зовнішній вигляд оболонки FR-Configurator.

Зовнішній вигляд дизельного двигуна GREENFIELD GF178 F і його основні параметри представлені на рисунку 3.5 і таблиці 3.1 відповідно.



Рисунок 3.5 - Дизельний чотиритактний двигун GREENFIELD GF178 F: 1 - паливний бак; 2 - пробка отвору для зливу палива; 3 - паливний кран; 4

- паливний насос; 5 - важіль регулювання обертів двигуна; 6 - кришка масляного картера / щуп; 7 - пробка отвору для зливу масла; 8 - гумова пробка; 9 - глушник; 10 - повітряний фільтр; 11 - пускова ручка; - 12 - ручний пусковий пристрій; 13 - важіль скидання тиску; 14 - масляний фільтр.

Таблиця 3.1

Основні технічні характеристики дизельного двигуна GREENFIELD GF178 F.

Розміри ДхШхВ	384x421x450
Маса, кг	33
Робочий об'єм, см ³	296
Діаметр циліндра х хід поршня, мм	78x62
Номінальна потужність, кВт/об/хв.	3,8/3000
	4,4/3600
Максимальна потужність, кВт/об/хв.	4,2/3000
	5,1/3600
Місткість паливного бака, л	3,5
Об'єм залитого мастила, л	1,1

Асинхронний двигун ДАР 112 М4 БУЗ-ІМ1081-ІТ02500-В і дизельний двигун GREENFIELD GF178 F кріпляться на раму випробувального стенду, а їх вали центруються і з'єднуються за допомогою спеціально виготовленої сполучної муфти.

Також для коректного модулювання зазначеної схеми нам необхідно ввести в неї додаткові вимірювальні прилади, в симуляції вони дадуть можливість отримати параметри модельованої системи на реальному стенді дадуть можливість контролювати наступні параметри:

- швидкість обертання колінчастого вала;
- тиск в системі мастила;
- навантажувальний момент;
- потужність;

- витрати палива.

Для завдання швидкості обертання і моменту навантаження випробовуваного двигуна в режимах холодної та гарячої обкатки під навантаженням використовується асинхронний електропривод, керований перетворювачем частоти Mitsubishi FR-A741-5,5K. Індикація та вимірювання швидкості обертання колінчастого вала, навантажувального моменту і потужності, що розвивається в режимах холодної обкатки і гарячої обкатки під навантаженням здійснюється перетворювачем частоти Mitsubishi FR-A741-5,5K і відображається на панелі FR-DU07. У режимі гарячої обкатки на холостому ходу вимірювання швидкості здійснюється за допомогою цифрового тахометра DT-2234C (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 - Цифровий тахометр DT-2234C + і манометр МТТ-16 для стенду для обкатки та випробувань ДВЗ МГТ.

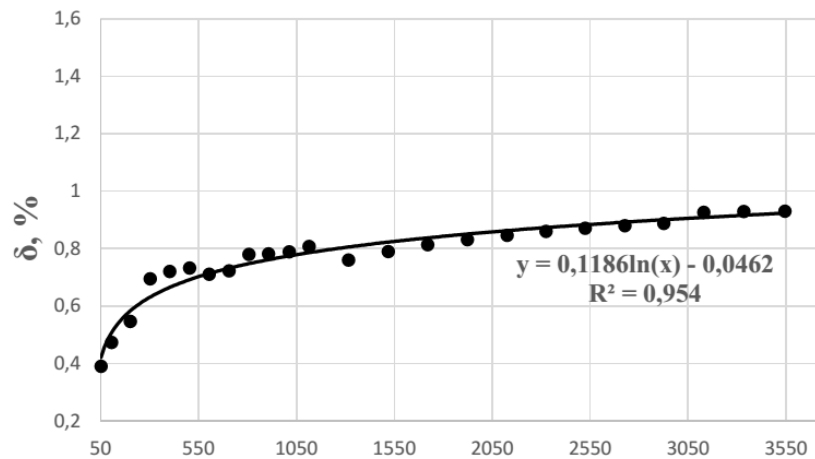
Параметри і показники, які визначаються в процесі симуляції представлені в таблиці 3.2.

Відносна похибка вимірювання швидкості перетворювачем частоти Mitsubishi FR-A741-5,5K оцінювалася щодо цифрового тахометра DT-2234C +. На рисунку 3.7 представлений графік, що показує межі відносної похибки вимірювання швидкості математичним апаратом перетворювача частоти FR-A741-5,5K щодо цифрового тахометра DT-2234C +.

Похибка параметрів і засобів вимірювань стенду.

Найменування контрольованого параметра чи показника	Одиниця вимірювання	Позн.	Найменування засобів вимірювання	Максимальна похибка вимірювання чи розрахунку
Швидкість обертання колінчастого вала ДВЗ в режимах холодної і гарячої обкатки на холостому ході	Об/хв.	n	Перетворювач частоти Mitsubishi FRA741-5,5K	1%
Швидкість обертання колінчастого вала ДВЗ в режим гарячої обкатки на холостому ході	Об/хв.	n	Цифровий тахометр DT-2234C +	$\pm (0,05 + 1 \text{ одиниця молодшого розряду})$ (0,1 об/хв. В інтервалі 2,5 до 999,9 об/хв.; 1 об/хв.. - понад 1000 об/хв.)
Навантажувальний момент	Н·м	$M_{кр}$	Перетворювач частоти Mitsubishi FRA741-5,5K	1,5%
Розвинута потужність	кВт	N_e	Перетворювач частоти Mitsubishi FRA741-5,5K	2,5%

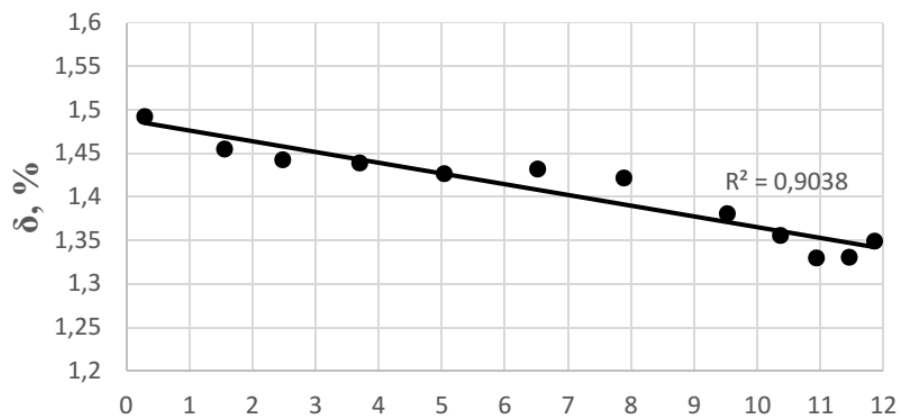
З рисунка 3.7 видно, що відносна похибка результатів вимірювання знаходиться в межах 1% на всьому діапазоні регулювання швидкості. Для оцінки похибки вимірювання моменту навантаження математичним апаратом перетворювача частоти FR-A741-5,5K використовувався датчик умовний датчик крутного моменту (з діапазоном вимірювання до 50 Н · м).



n, об/хв.

Рисунок 3.7 - Відносна похибка вимірювання швидкості випробувальної схеми стенду ДВЗ МГТ.

Вимірювання моменту навантаження проводилися від мінімального до номінального моменту випробовуваного двигуна. Похибка результатів вимірювання представлена на рисунку 3.8.



M_{кр} Н·м.

Рисунок 3.7 - Відносна похибка вимірювання моменту навантаження схеми випробувального стенду.

З малюнка 3.7 видно, що відносна похибка результатів вимірювання знаходиться в межах 1,5% на всьому діапазоні регулювання навантажувального випробувального стенду двигунів малогабаритних тракторів.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Результати симуляції процесу роботи випробувального стенду двигунів малогабаритних тракторів в режимі холодного обкатування

У цьому розділі магістерської роботи представлені результати симуляції процесу роботи випробувального стенду в режимі холодного обкатування ДВС з безступінчастим і ступінчастим завданням швидкості обертання при відкритому і закритому декомпресор дизельного двигуна GREENFIELD GF178 F. Симуляція проводилась за схемою рисунок 2.6 – 2.7.

На рисунку 4.1 представлений графік ступеневої зміни швидкості обертання ДВЗ з відкритим декомпресором.

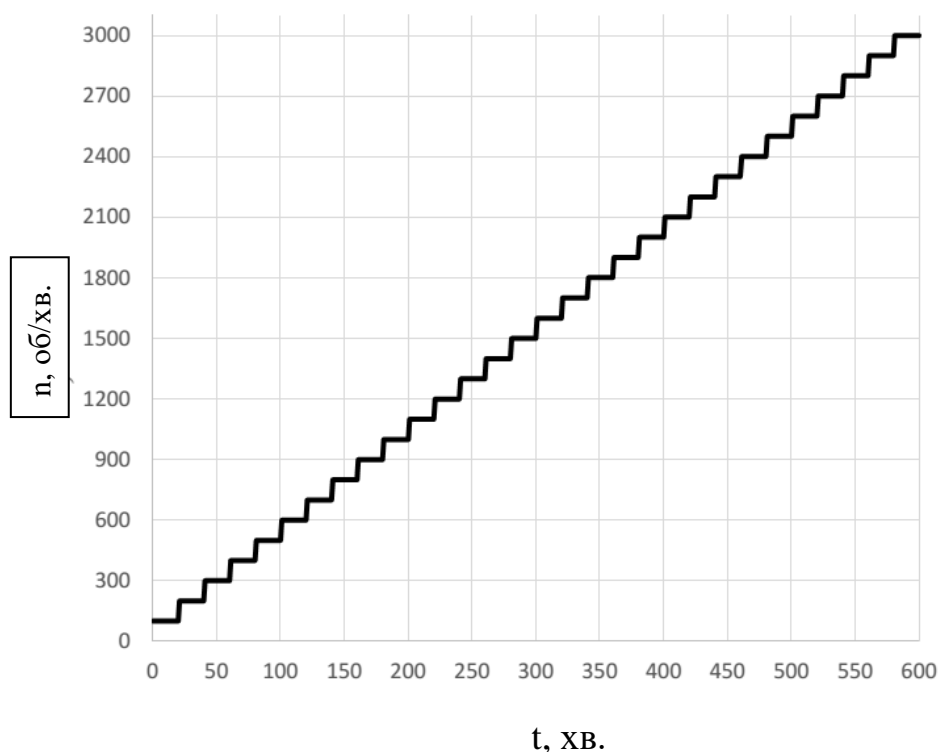


Рисунок 4.1 - Графік ступеневої зміни швидкісного режиму при холодній обкатці ДВЗ (декомпресор відкритий).

Як видно з графіка рисунок 4.1, в усьому діапазоні випробувань стенд забезпечує високу стабільність швидкісних режимів на кожному ступені обкатки.

На рисунку 4.2 показана можливість ступеневого завдання швидкості обертання електричного двигуна модельованого стенду на низьких швидкостях обертання.

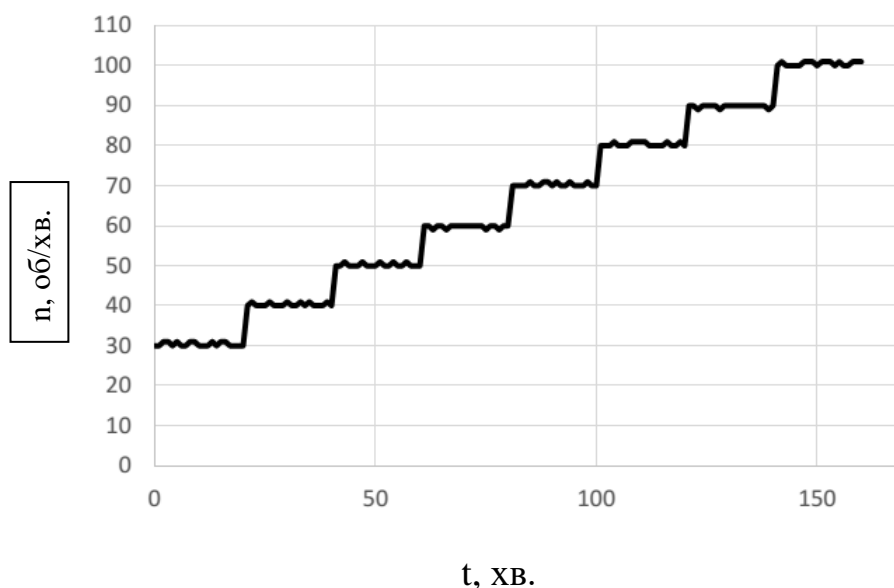


Рисунок 4.2 - Графік ступеневої зміни швидкісного режиму при холодній обкатці ДВР на низьких швидкостях обертання (декомпресор відкритий).

На малюнку 4.2 видно, що з плином всього часу обкатки швидкість обертання електричного двигуна випробувального стенду підтримувалася на рівні ± 1 об/хв. Зі збільшенням швидкості обертання асинхронного короткозамкнутого двигуна від 100 до 3000 об/хв. (рисунок 4.1) даний показник зростав з ростом частоти обертання і досяг свого максимуму на 3000 об/хв - ± 6 об/хв. При цьому відхилення в підтримці швидкості обертання асинхронного двигуна склало 3,3% при 30 об/хв. і 0,2% при 3000 об/хв.

Це пояснюється труднощами завдання і підтримки швидкості обертання асинхронного електроприводу з векторним алгоритмом управління без використання датчика швидкості саме на низьких оборотах [32-35]. Результати симуляції також показали, що розроблена схема випробувального стенду здатна забезпечити ступеневу обкатку ДВЗ малогабаритної сільськогосподарської техніки тягового класу 0,1 і 0,2 при

відкритому декомпресорі в діапазоні від 30 до 3000 об/хв., з кроком 1 об/хв. Верхня межа швидкісного режиму випробувального стенду обмежується значенням 3000 з-за застосованого в конструкції стенду асинхронного двигуна з номінальною частотою обертання 1440 об/хв., і максимальною 3000 об/хв., з числом пар полюсів 2 і обмеженими функціональними можливостями регулювання частоти обертання перетворювачем Mitsubishi FR-A741-5,5K (від 0 до 120 Гц), а нижня межа 30 об/хв., - можливостями векторного алгоритму управління. При необхідності розширення верхньої межі регулювання швидкості випробувального стенду можливо установкою асинхронного короткозамкнутого двигуна з числом пар полюсів 1.

Результати симулювання швидкісного режиму випробувального стенду при закритому декомпресорі відображені на рисунку 4.3.

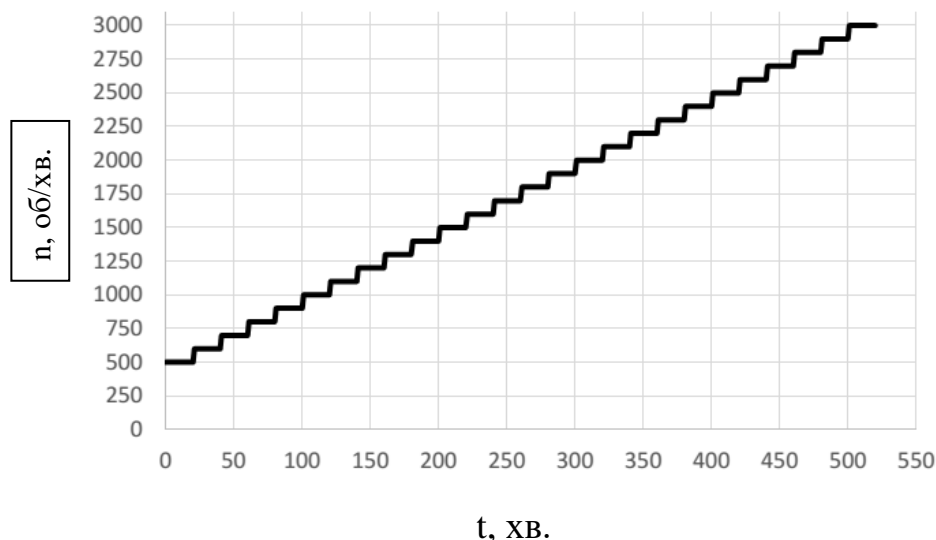


Рисунок 4.3 - Графік ступеневої зміни швидкісного режиму при холодній обкатці ДВЗ (декомпресор закритий).

В ході проведення даної симуляції було встановлено, що стенд здатний забезпечити холодну обкатку ДВЗ МГТ при закритому декомпресорі з 500 об/хв., до 3000 об/хв., з кроком завдання 1 об/хв. Падіння нижньої межі діапазону регулювання швидкості обертання випробувального стенду двигунів МГТ з закритим декомпресором пояснюється зростанням навантаження на валу електричного двигуна, що тягне за собою необхідність збільшення крутного моменту електродвигуна, необхідного на прокрутку

колінчастого вала ДВЗ. Графік залежності крутного моменту асинхронного двигуна випробувального стенду від швидкості обертання колінчастого вала в режимі холодної обкатки ДВЗ при закритому декомпресорі представлений на рисунку 4.4.

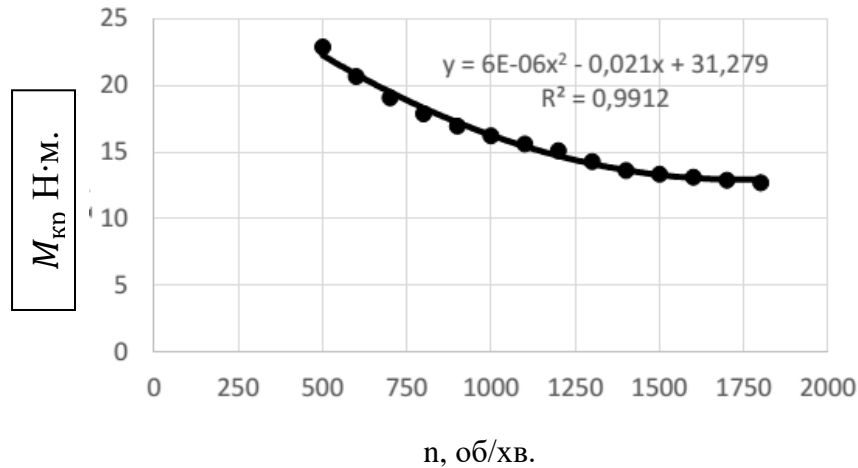


Рисунок 4.4 - Графік залежності крутного моменту асинхронного двигуна випробувального стенду від швидкості обертання колінчастого вала в режимі холодної обкатки ДВЗ (декомпресор закритий).

При цьому активна потужність, споживана електроприводом випробувального стенду, в залежності від швидкості обертання зростає за лінійною залежності, що представлена на рисунку 4.5.

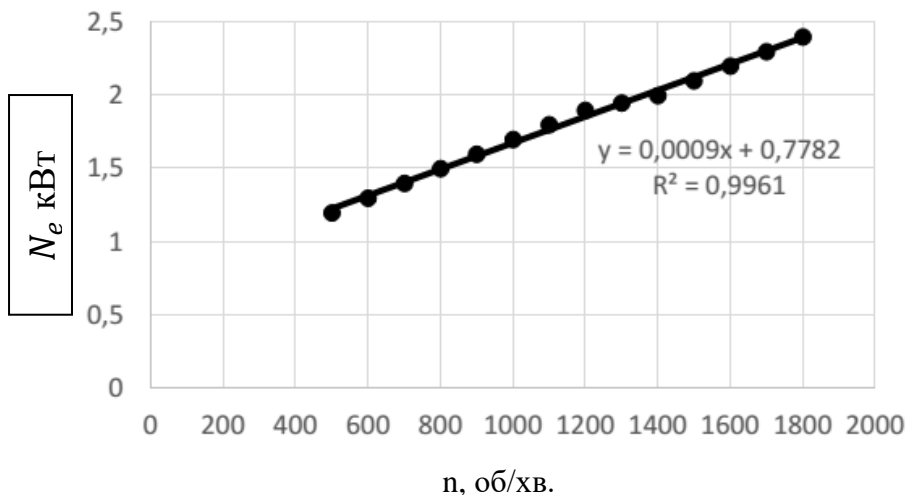


Рисунок 4.5 - Графік залежності активної потужності, споживаної електроприводом випробувального стенду, від швидкості обертання колінчастого вала в режимі холодної обкатки ДВЗ (декомпресор закритий).

Також в результаті проведених досліджень встановлено залежність активної потужності, споживаної електроприводом випробувального стенду, від часу обкатки і швидкості обертання колінчастого вала ДВЗ (рисунок 4.6).

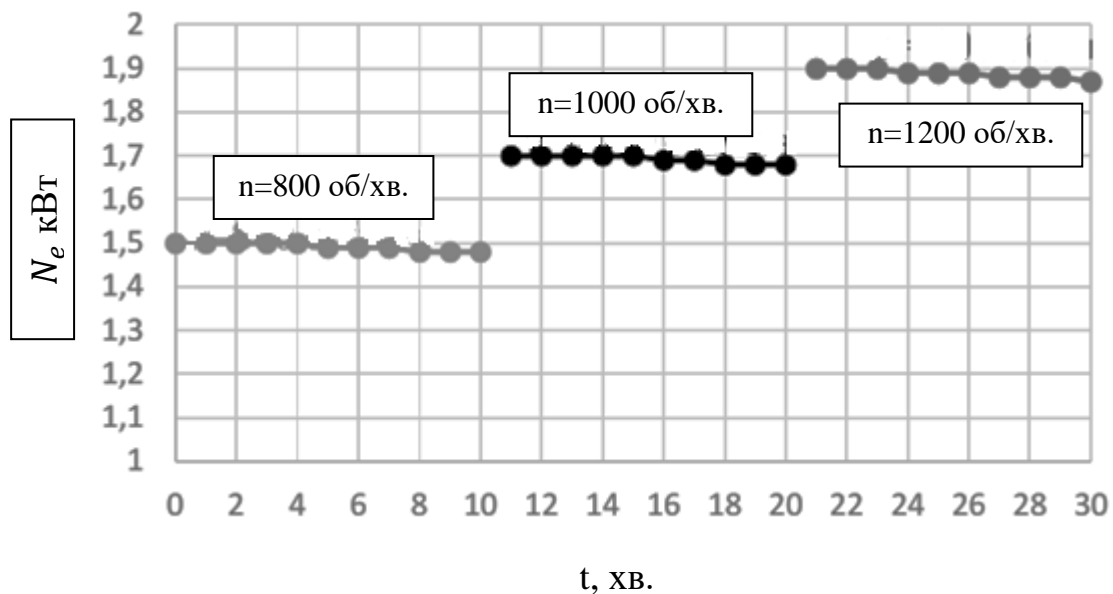


Рисунок 4.6 - Графік залежності активної потужності, споживаної електроприводом випробувального стенду, від часу обкатки і швидкості обертання колінчастого вала в режимі холодного обкатування ДВС (Декомпресор закритий).

З рисунка 4.7 видно, що активна потужність, споживана електроприводом випробувального стенду, протягом часу ступенів лінійно знижується, а при переході на наступні ступені - стрибкоподібно зростає. Це пояснюється зниженням крутного моменту, необхідного на прокрутку, внаслідок протікання процесів припрацювання і нагрівання масла, а також його ростом при збільшенні частоти обертання.

Таким чином результати проведених симуляційних досліджень випробувального стенду ДВЗ МГТ в режимі холодного обкатування показали широкий діапазон регулювання швидкості обертання ДВЗ і високу точність її підтримки. Також були встановлені обмеження стенду при завданні швидкості обертання для безступінчастої і ступінчастої холодної обкатки ДВЗ малогабаритної сільськогосподарської техніки від 30 до 3000 об/хв. (з кроком завдання від 1 об/хв.) при відкритому декомпресорі і від 500 до 3000 об/хв., (з кроком завдання від 1 об/хв.,) - при закритому. При цьому

відхилення в підтримці швидкості знаходилося в межах від 0,2% до 3,3% і зменшувалася із зростанням частоти обертання.

4.2 Технології стендової обкатки двигунів малогабаритних тракторів

Новий або зібраний після ремонту двигун внутрішнього згорання, встановлюваний на малогабаритну сільськогосподарську техніку, доцільно піддати обкатці, а потім випробувань на розробленому обкатному-гальмівному стенді. Стенд дозволяє проводити обкатку таких двигунів в три етапи: холодна обкатка, гаряча обкатка на холостому ході і гаряча обкатка під навантаженням. Для розглянутих режимів роботи електричного стенду розроблені технології по їх проведенню [1, 4-7, 11-14, 21].

Технологія холодного обкатування двигунів малогабаритних тракторів із ступінчастою зміною швидкісного режиму.

А) Холодну обкатку двигунів МГТ із ступінчастою зміною швидкісного режиму рекомендується проводити в наступній послідовності:

1. Двигун, який підлягає обкатці, встановити на раму випробувального стенду.

2. Поєднати центри колінчастого вала і вала ротора асинхронного короткозамкнутого двигуна, шляхом ослаблення і підтягування кріпильних з'єднань.

3. Об'єднати вал електричної машини з валом ДВЗ за допомогою сполучної муфти.

4. Перевірити комплектність ДВЗ і зазори в клапанному механізмі. При необхідності доукомплектувати і провести регулювальні роботи.

5. Заповнити піддон картера двигуна моторним маслом згідно з нормами на експлуатацію даної марки ДВЗ.

6. Відключити подачу палива.

7. По черзі включити вимикачі.

В результаті чого відбудеться включення перетворювача частоти Mitsubishi FRA741-5,5K і запуститься система незалежного охолодження обмоток асинхронного короткозамкнутого двигуна ДАР 112 М4 буз-ІМ1081-ІТ02500-В, постійно працює з частотою обертання живильної мережі 50 Гц.

8. На панелі керування FR-DU07 Mitsubishi FR-A741-5,5K натиснути клавішу «PU / EXT», що переводять перетворювач частоти в режим управління з панелі FR-DU07. Світлодіод індикації робочого режиму спалахує в режимі «PU».

9. Потім на панелі FR-DU07, за допомогою цифрового диска налаштувань параметрів, задати швидкість обертання асинхронного короткозамкнутого двигуна в об/хв згідно з технічними вимогами для ДВЗ кожної марки і натисненням клавіші «SET» підтвердити завдання необхідної швидкості обертання.

10. Далі натиснути клавішу «FWD» на панелі управління FR-DU07 Mitsubishi FR-A741-5,5K, в результаті чого відбудеться запуск асинхронного короткозамкнутого двигуна зі швидкістю обертання, заданої в пункті 9. Почнеться процес холодної обкатки ДВЗ.

11. Контролювати час кожного ступеня холодної обкатки ДВЗ за допомогою секундоміра. Для переходу до наступний рівень холодної обкатки ДВЗ використовувати цифровий диск налаштувань параметрів для завдання необхідної швидкості обертання і клавішу підтвердження «SET».

12. Після закінчення всього часу обкатки двигуна натиснути клавішу «Stop / Reset» на панелі управління перетворювача частоти FR-DU07, в наслідок чого відбудеться повна зупинка двигунів.

13. Виключити автоматичні вимикачі керування системою живлення;

14. ДВЗ оглянути і при необхідності підтягнути кріплення.

Б) Технологія холодної обкатування двигунів малогабаритних тракторів з безступінчастою зміною швидкісного режиму.

Холодну обкатку двигунів МГТ з безступінчастою зміною швидкісного режиму рекомендується проводити в наступній послідовності:

1. Двигун, який підлягає обкатці, встановити на раму випробувального стенду.

2. Поєднати центри колінчастого вала і вала ротора асинхронного короткозамкнутого двигуна, шляхом ослаблення і підтягування кріпильних з'єднань.

3. Об'єднати вал електричної машини з валом ДВЗ за допомогою сполучної муфти.

4. Перевірити комплектність ДВЗ і зазори в клапанному механізмі. При необхідності доукомплектувати і провести регулювальні роботи.

5. Заповнити піддон картера двигуна моторним маслом згідно з нормами на експлуатацію даної марки ДВЗ.

6. Відключити подачу палива.

7. По черзі включити автоматичні вимикачі керування системою живлення.

В результаті чого відбудеться включення перетворювача частоти Mitsubishi FRA741-5,5K і запуститься система незалежного охолодження обмоток асинхронного короткозамкнутого двигуна ДАР 112 М4 буз-ІМ1081-ІТ02500-В, постійно працює з частотою обертання живильної мережі 50 Гц.

8. На панелі керування FR-DU07 Mitsubishi FR-A741-5,5K натиснути клавішу «PU / EXT», що переводять перетворювач частоти в режим управління з панелі FR-DU07. Світлодіод індикації робочого режиму загориться в режимі «PU».

9. Після чого натисканням клавіші «MODE» перевести перетворювач частоти в режим установки параметрів. За допомогою цифрового диска налаштувань параметрів перетворювача частоти Mitsubishi FR-A741-5,5K черзі задати параметри «P20», відповідний максимальної швидкості обкатки ДВЗ (об/хв.), і «P7», відповідного часу проведення обкатки ДВЗ в секундах, підтверджуючи кожну дію натисканням клавіші «SET». В результаті чого в пам'ять контролера перетворювача частоти Mitsubishi FR-A741-5,5K відбудеться запис цих параметрів.

10. Далі натисканням клавіші «FWD» на панелі управління FR-DU07 Mitsubishi FR-A741-5,5K провести запуск асинхронного коротко замкнутого двигуна з плавним збільшенням частоти обертання з нульовою до заданої в параметрі «P20» протягом часу, заданого в параметрі «P7». Почнеться процес холодної обкатки двигуна з безступінчастою зміною швидкісного режиму.

11. Контролювати показання швидкості обертання на 4-розрядному світлодіодному індикаторі FR-DU07. Після досягнення показань швидкості обертання на світлодіодному індикаторі FR-DU07, заданої в параметрі перетворювача частоти Mitsubishi FR-A741-5,5K «P20», здійснити зупинку процесу обкатки ДВЗ шляхом натискання клавіші «Stop / Reset».

12. Повернути значення параметрів «P20» і «P7» до початкових налаштувань способом, описаним в пункті 9.

13. Виключити автоматичні вимикачі 2, 3 і 4.

14. ДВС оглянути і при необхідності підтягнути кріплення.

В) Технологія гарячої обкатки двигунів малогабаритних тракторів без навантаження.

Гарячу обкатку двигунів МГТ без навантаження рекомендується проводити в наступній послідовності:

1. Провести підготовку двигуна до пуску.

2. Включити подачу палива, попередньо прокачавши паливну систему від повітря.

3. По черзі включити автоматичні вимикачі керування мережею живлення.

В результаті чого відбудеться включення перетворювача частоти Mitsubishi FRA741-5,5K і запуситься система незалежного охолодження обмоток асинхронного короткозамкнутого двигуна ДАР 112 М4 буз-ІМ1081-ІТ02500-В, постійно працює з частотою обертання живильної мережі 50 Гц.

4. На панелі керування FR-DU07 Mitsubishi FR-A741-5,5K натиснути клавішу «PU / EXT», що переводять перетворювач частоти в режим

управління з панелі FR-DU07. Світлодіод індикації робочого режиму загориться в режимі «PU».

5. Потім на панелі FR-DU07, за допомогою цифрового диска налаштувань параметрів, задати швидкість обертання асинхронного короткозамкнутого двигуна в об/хв. і натисканням клавіші «SET» підтвердити завдання необхідної швидкості обертання.

6. Далі натисканням клавіші «FWD» на панелі управління FR-DU07 Mitsubishi FR-A741-5,5K провести запуск асинхронного коротко замкнутого двигуна зі швидкістю обертання, заданої в пункті 4. Як тільки швидкість обертання асинхронного короткозамкнутого двигуна буде вище або дорівнюватиме швидкості холостого ходу ДВЗ відбудеться його запуск.

7. Після запуску ДВЗ відключити загальне живлення стенду шляхом виключення автоматичного вимикача. В результаті чого ДВЗ набере швидкість обертання, що відповідає номінальній.

8. Обороти ДВЗ змінювати за допомогою важеля регулювання обертів, задаючи тим самим необхідну швидкість обертання ДВЗ на кожній ступені обкатки.

9. Контролювати час кожного ступеня обкатки за допомогою секундоміра, а швидкість обертання за допомогою цифрового тахометра DT-2234C +.

10. Перевірити тиск масла в системі змащення, виміряти і при необхідності відрегулювати мінімальну стійку і максимальну частоту обертання колінчастого вала на холостому ході. За допомогою стетоскопа прослухати ДВЗ в зонах можливих стукотів (зона поршневих пальців, поршнів, шатунних і корінних підшипників).

11. Здійснити плавну зупинку ДВЗ шляхом зміни положення важеля регулювання обертів.

12. Після зупинки ДВЗ оглянути і при необхідності усунути виявлені несправності.

Г) Технологія гарячої обкатки двигунів малогабаритних тракторів під навантаженням.

Гарячу обкатку двигунів МГТ під навантаженням рекомендується проводити в наступній послідовності:

1. Провести підготовку двигуна, встановленого на стенд, до обкатки.
2. Включити подачу палива, попередньо прокачавши паливну систему від повітря.
3. По черзі включити автоматичні вимикачі керування мережею живлення.

В результаті чого відбудеться включення перетворювача частоти Mitsubishi FRA741-5,5K і запуститься система незалежного охолодження обмоток асинхронного короткозамкнутого двигуна ДАР 112 М4 буз-ІМ1081-ІТ02500-В, постійно працює з частотою обертання живильної мережі 50 Гц.

4. На панелі керування FR-DU07 Mitsubishi FR-A741-5,5K натиснути клавішу «PU / EXT», що переводять перетворювач частоти в режим управління з панелі FR-DU07. Світлодіод індикації робочого режиму загориться в режимі «PU».

5. Після чого натисканням клавіші «MODE» перевести перетворювач частоти в режим установки параметрів. За допомогою цифрового диска налаштувань параметрів перетворювача частоти Mitsubishi FR-A741-5,5K задати значення параметра «P800» рівним «11», що відповідає режиму бездатчикового векторного управління крутним моментом. Дія підтвердити натисканням клавіші «SET».

6. Натисканням клавіші «FWD» запустити асинхронний двигун, який повідомляє ДВЗ швидкість вище швидкості холостого ходу. В результаті ДВЗ запускається, а його швидкість відповідає номінальній швидкості обертання.

7. Потім на панелі управління FR-DU07 натиснути клавішу «MODE» і з допомогою цифрового диска налаштувань параметрів перетворювача частоти Mitsubishi FR-A741-5,5K задати значення параметра «P805», який відповідає значенню крутного моменту на валу асинхронного

короткозамкнутого двигуна, який повідомляє ДВЗ гальмівний момент. Запис значень параметра «P805» підтверджується клавішею «SET».

8. Для повідомлення навантажувальному пристрою іншого значення крутного моменту асинхронного короткозамкнутого двигуна повторити пункт 7.

9. У процесі проведення обкатки здійснювати контроль розвинутої потужності на валу ДВЗ і його швидкості на 4-розрядному світлодіодному індикаторі FR-DU07. Для контролю часу обкатки використовувати секундомір. Значення навантажувального моменту знаходять з відомого співвідношення:

$$M_{кр} = \frac{9550 \cdot N_e}{n}, \text{ (Н}\cdot\text{м)} \quad (4.1)$$

де N_e - потужність, що розвивається на валу ДВЗ, кВт; n - швидкість обертання колінчастого вала ДВЗ, об/хв.

10. По закінченню процесу обкатки відключити автоматичний вимикач, в результаті чого скинеться навантаження з ДВЗ.

11. Здійснити плавну зупинку ДВЗ шляхом зміни положення важеля регулювання обертів.

12. Після зупинки ДВЗ оглянути і при необхідності усунути виявлені несправності.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА СТЕНДОВОЇ ОБКАТКИ ДВИГУНІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ТРАКТОРІВ

Відомо, що якісна заводська і післяремонтна обкатка дозволяє продовжити термін служби і збільшити ресурс ДВЗ на 20-40% [1, 5-19, 21-29]. Стосовно до двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки заводами-виробниками і ремонтними підприємствами, як правило, не проводиться стендова обкатка. Однак в технічній документації на такі ДВС вказується необхідність даної операції. Заводи-виробники настійно рекомендують в початковий період експлуатації провести попередню обкатку двигунів зважаючи на необхідності припрацювання деталей тертя. Ними наголошується, що довговічність і економічність роботи ДВЗ в більшій мірі залежить від дотримання режиму експлуатації в період обкатки.

Робота ДВЗ на повній потужності без попередньої обкатки може викликати швидкий знос поверхонь тертя деталей, привести до заклинювання, задирів і поломок. Згідно з паспортними даними тривалість експлуатаційної обкатки ДВЗ, що встановлюються на малогабаритну сільськогосподарську техніку, становить від 20 до 100 годин в залежності від типу двигуна. У цей період заводи-виробники рекомендують особливу увагу приділяти двигуну: перші години обкатки робити тільки на холостому ході, застосовувати тільки рекомендовані сорти палива і масла, які не навантажувати непрогрітий ДВЗ, а прогрів проводити на середніх оборотах без навантаження. Стендова обкатка двигунів МГТ дозволить вирішити дану проблему.

Для оцінки економічного ефекту від стендової обкатки одного двигуна $T_{j,r}$ ДВР - скористаємося наступним виразом [36]:

$$E_{\text{обк.ДВЗ}} = \frac{C_{\text{ДВЗ}}}{M_{\text{не обк.ДВЗ}}} \cdot (M_{\text{обк.ДВЗ}} - M_{\text{не обк.ДВЗ}}) \quad (5.1)$$

де $C_{\text{ДВЗ}}$ - вартість двигуна, грн; $M_{\text{не обк.ДВЗ}}$ - моторесурс не обкатаного двигуна, мотогодин; $M_{\text{обк.ДВЗ}}$ - моторесурс обкатаного двигуна, мотогодин.

Вартість двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки в діапазоні потужностей від 1 до 9 к.с. варіюється від 2800 до 21000 грн. при заявленому моторесурсі 1000-6000 мотогодин. Усереднюючи дані показники отримуємо, що середня вартість двигуна малогабаритної сільськогосподарської техніки становить $C_{ДВЗ.сер} = 11900$ грн. при середньому значенні моторесурсу $M_{не обк.ДВЗ.сер} = 3500$ мотогодин. Підставивши усереднені значення показників $C_{ДВЗ.сер}$ і $M_{не обк.ДВЗ.сер}$ в вираз (4.1), задавшись при цьому умовою, що якісно проведена обкатка дозволить збільшити термін служби двигуна на 10%, отримуємо таке значення економічного ефекту від стендової обкатки одного ДВЗ $E_{обк.ДВЗ}$:

$$E_{обк.ДВЗ} = \frac{11900}{3500} \cdot (3850 - 3500) = 1190 \text{ грн.}$$

Однак тільки по даному економічному показнику не доцільно судити про економічний ефект стендової обкатки двигунів МГТ. Необхідно врахувати вартість самого випробувального стенду, що є сумою всіх його комплектуючих і витратних матеріалів. Вартість розробленого стенду $C_{ст}$ визначимо відповідно до наступного виразу:

$$C_{ст} = C_{АД} + C_{ПЧ} + C_{тах} + C_{д.т} + C_{в.пал} + C_{в.мат} \quad (5.2)$$

де $C_{ПЧ}$ - вартість перетворювача частоти, грн.; $C_{АД}$ - вартість асинхронного короткозамкнутого двигуна, грн.; $C_{тах}$ - вартість цифрового тахометра, грн.; $C_{д.т}$ - вартість датчика тиску в системі змащення ДВЗ, грн.; $C_{в.пал}$ - вартість пристрою масового вимірювання витрати палива, грн.; $C_{в.мат}$ - вартість витратних матеріалів, грн.

У вартість витратних матеріалів $C_{в.мат}$ включена вартість рами обкатно-гальмівного стенду, сполучної муфти валів двигунів, захисного кожуха, системи відводу відпрацьованих газів, автоматичних вимикачів, сполучних кабелів і проводів, а також інших необхідних сполучних і кріпильних пристроїв.

У таблиці 5.1 представлена вартість обладнання та комплектуючих випробувального стенду двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки.

Таблиця 5.1

Вартість обладнання та комплектуючих випробувального стенду двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки.

№	Назва обладнання	Вартість, грн.
1	Перетворювач частоти Mitsubishi FR-A741-5,5K	29107
2	Асинхронний короткозамкнений двигун ДАР 112 М4 буз-ІМ1081-ІТ02500-В	20263
3	Цифровий тахометр DT-2234С +	270
4	Датчик тиску в системі змащення ДВС (манометр МТТ-16)	257
5	Пристрій масового вимірювання витрати палива	1123
6	Витратні матеріали	5068

Підставляючи дані з таблиці 4.1 в вираз (4.2) розрахуємо вартість випробувального стенду ДВЗ МГТ $C_{ст}$:

$$C_{ст} = 20263 + 29107 + 270 + 257 + 1123 + 5068 = 56088 \text{ грн.}$$

Загальну економічну ефективність запропонованого рішення $E_{заг}$ визначимо за наступним виразом:

$$E_{заг} = k \cdot E_{обк.ДВЗ} - C_{ст} \quad (5.3)$$

де k - кількість обкатаних ДВЗ.

За умови, що на стенді обкатана 100 двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки із середнім економічним ефектом від стендової обкатки одного двигуна $E_{обк.ДВЗ} = 1190$ грн. Отримуємо наступну загальну економічну ефективність запропонованого рішення $E_{заг}$:

$$E_{заг} = 100 \cdot 1190 - 56088 = 62912 \text{ грн.}$$

Таким чином загальна економічна ефективність запропонованого рішення склала $E_{\text{заг}} = 62912$ грн. З виразу (5.3) видно, що з збільшенням значення k загальна економічна ефективність k буде рости, а отже, доцільність застосування технологій і технічних засобів для обкатки та випробувань ДВЗ малогабаритних тракторів з кожним обкатаним двигуном буде збільшуватися.

Висновки

В процесі написання магістерської роботи нами виконано теоретичне обґрунтування способу векторного бездатчикового регулювання навантажувально-швидкісного режиму роботи випробувального стенду двигунів малогабаритних тракторів. Розроблено математичну модель, структурні і функціональні схеми системи управління навантажувально-швидкісними режимами роботи електричного стенду, що дозволяють встановити математичні, структурні і функціональні зв'язки параметрів в системі бездатчикового управління крутним моментом і швидкістю обертання асинхронного двигуна обкатного-гальмівного стенду.

Розроблено функціональну схеми технічного засобу для обкатки і випробування двигунів малогабаритних тракторів, що дозволяють проводити холодну (ступеневу і безступінчасту) і гарячу (з навантаженням і на холостому ходу) обкатки двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки з можливістю контролю швидкості обертання колінчастого вала (похибка не більше 1%), навантажувального моменту (не більше 1,5%), потужності (не більше 2,5%)

Дослідження по за допомогою комп'ютерної моделі в системі Mat Lab Simulink показали, що, випробувальний стенд дозволяє проводити холодну обкатку ДВЗ малогабаритних тракторів при ступінчастому і безступінчастому завданні швидкісного режиму обкатки з відкритим (від 30 до 3000 об/хв. з кроком завдання 1 об/хв.) і закритим декомпресором (з 500 до 3000 об/хв. з кроком завдання 1 об/хв.), випробувальний стенд забезпечує високу стабільність швидкісних режимів на кожному ступені обкатки. При цьому відхилення в підтримці частоти обертання найбільш відчутно на мінімальних швидкостях обертання (3,3% при 30 об/хв.) і зменшується в міру її збільшення (0,2% при 3000 об/хв.), при безступінчастому завданні частоти обертання випробувального стенду спостерігалось незначне відхилення в плавності наростання швидкості розгону асинхронного двигуна на ділянці

від 0 до 100 оборотів. Електродвигун на даній ділянці досягав необхідної частоти обертання на 13 с раніше заданих 2 хв., що пояснюється неможливістю пуску і подальшої плавної роботи застосовуваного типу електричного двигуна на оборотах близьких до нульових, випробувальний стенд в режимі гарячої обкатки забезпечує регулювання навантажувального моменту ДВЗ малогабаритних тракторів в межах від 0 до 36 Н м з кроком завдання 0,2 - 0,4 Н м при швидкостях обертання не більше 3600 об/хв.

Розроблений стенд в процесі симуляції забезпечив можливість контролю силових показників двигунів малогабаритних тракторів на різних швидкісних і навантажувальних режимах, при використанні реального стенду додається можливість контролю витрати палива. При симуляції випробування на стенді дизельного двигуна GREENFIELD GF178 F, що встановлюється на малогабаритні трактори GREENFIELD МБ-105, GREENFIELD МБ-90D, GREENFIELD МБ-1100AE і ін., Потужність склала 3,87 кВт при частоті обертання 3000 об/хв., що відповідає паспортним даним на двигун (3,8 кВт).

Загальна економічна ефективність запропонованого рішення з урахуванням вирахування собівартості стенду склала 62912 грн. на 100 обкатаних двигунів малогабаритних тракторів.

Рекомендації та перспективи подальшої розробки теми. Особливий інтерес для подальшого розвитку теми вдосконалення технологій і технічних засобів для обкатки і випробування двигунів малогабаритних тракторів представляють питання лабораторних досліджень для підтвердження результатів математичного моделювання та комп'ютерної симуляції запропонованої конструкції та параметрів стенду.

Нові знання дозволять істотно підвищити якість виробництва і ремонту двигунів малогабаритної сільськогосподарської техніки.

Список використаних джерел

1. Сідашенко О.І. Ремонт машин та обладнання: Підручник /за ред. О.І. Сідашенко, О.А. Науменка. - Х.: "Міськдрук", 2010. -744 с.
2. Паладійчук Ю.Б, Зінев М.В. Спеціалізовані ремонтні підприємства, стан і перспективи розвитку чи занепаду // Сучасні проблеми землеробської механіки: збірник наукових праць XVIII міжн. наук. конф. (1618 жовтня 2017 р., м. Кам'янецьПодільський). Тернопіль : Крок, 2017. 240 с
3. Сидорчук О. В., Котенко С. С., Василенко М. О., Кучерявий В. М. Проблеми технічного сервісу сільськогосподарської техніки. Механізація та електрифікація сільського господарства. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. Т.2. Глеваха, 2014. Випуск 99. С. 299307.
4. Технічний сервіс в АПК: навчальний посібник / Л.В. Швець, Ю.Б. Паладійчук, О.О. Труханська. Вінниця: ВНАУ, 2019. – 648 с.
5. Лауш П.В. і ін. Технічне обслуговування і ремонт машин. – К.: Вища школа, 2013.
6. Чикунов, Ю. М. Теоретичне обґрунтування енергозберігаючої системи стендів для обкатки і випробування двигунів внутрішнього згорання /Ю. М. Чикунов // Енергобезпека і енергозбереження. - 2012. - № 3. -С. 23-25.
7. Савченко, Н. З. Теоретичні і експериментальні основи процесу припрацювання сполучених деталей двигунів внутрішнього згорання: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.412 / Н.З. Савченко. - Київ, 1971. - 55 с.
8. Жданко, Д. А. Ресурсозбереження при обкатці відремонтованих двигунів вдосконаленням обкатному-гальмівного стенду / Д. А. Жданко, А. В. Новіков, Я. Т. Тимошенко // Вісник Української державної сільськогосподарської академії. - 2009. - № 1. - С. 124-127.
9. Мельников, Г. І. Способи побудови енергозберігаючих електромеханічних стендів для випробування двигунів внутрішнього згорання / Г. І. Мельников, А. О. Коротков // Вісник НТУ «ХП». - 2014. - №24 (1067). - С. 56-62.

10. Прилепський, Ю. В. Підвищення ефективності стендової обкатки двигунів внутрішнього згоряння / Ю. В. Прилепський // Вісник донецької академії автомобільного транспорту. - 2015. - № 1. - С. 42-54
11. Рябов, А. В. Обґрунтування режиму холодної обкатки автомобільних двигунів при капітальному ремонті / А. В. Рябов, Л. І. Крепс // Двигунобудування. - 1989. - №8. - С. 34-36.
12. Миколаїв, С.Н. Сучасний технічний сервіс техніки: світовий досвід [Текст] / С.М. Миколаїв // Будівельна техніка та технології. -2002 2.
13. Тимохін, С. В. Обкатка дизелів з динамічним навантаженням / С. В. Тимохін // Матеріали НПК професорсько-викладацького складу і фахівців сільського господарства. - Мінськ, 1997. - С.11-12.
14. Mavrelou, Christoforos & Theotokatos, Gerasimos. (2018). Numerical investigation of a premixed combustion large marine two-stroke dual fuel engine for optimising engine settings via parametric runs. *Energy Conversion and Management*. 160. 10.1016/j.enconman.2017.12.097.
15. Brown, Sean P., and Hagen, Christopher L. "Optimized Engine Performance for a 1 KW UAV Hybrid Powertrain." *Proceedings of the ASME 2017 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. Volume 2: Emissions Control Systems; Instrumentation, Controls, and Hybrids; Numerical Simulation; Engine Design and Mechanical Development*. Seattle, Washington, USA. October 15–18, 2017. V002T05A004. ASME. <https://doi.org/10.1115/ICEF2017-3555>
16. Стенди динамічні для обкатки двигунів внутрішнього згоряння / Електронний ресурс // Режим доступу вільний: <http://kopis.ru/products/138>
17. Стенди для обкатки двигунів / Електронний ресурс // Режим доступу вільний: <http://www.ural-k-s.ru/p/stendy-obkatki-ispytaniya-dvigatelye.html>
18. Стенд для обкатки и испытания двигателей внутреннего сгорания КИ-35503 / Електронний ресурс // Режим доступу вільний: http://gosniti.com/products_equipment%2061.html

19. Частотні перетворювачі для електродвигунів / Електронний ресурс // Режим доступу вільний: <https://ventilator.ua/ua/category/chastotnye-preobrazovateli/>
20. Перетворювач частоти / Електронний ресурс // Режим доступу вільний: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Перетворювач частоти](https://uk.wikipedia.org/wiki/Перетворювач_частоти).
21. Чикунов, Ю. М. Теоретичне обґрунтування енергозберігаючої системи стендів для обкатки і випробування двигунів внутрішнього згоряння / Ю. М. Чикунов // Енергобезпека і енергозбереження. - 2012. - № 3. - С. 23-25.
22. ДСТУ ISO 26322-2:2013 Сільськогосподарські та лісогосподарські трактори. Вимоги щодо безпеки. Частина 2. Трактори вузькоколіїні та малогабаритні (ISO 26322-2:2010, IDT)
23. ГОСТ 28523-90. Мобільні засоби малої механізації сільськогосподарських робіт. Трактори малогабаритні. Типи і основні параметри. М.: Изд-во стандартов, 1990 - 3 с.
24. Ackermann, T. Wind power in power system / T. Ackermann. – Wiley Ltd., 2005. – 696 p. 182. Hassanzadeh, F. Stability analysis and optimal state feedback control of back-to-back converter / F. Hassanzadeh, A. Hajizadeh, F. Abbasi // Journal of Technology Innovations in Renewable Energy. – 2013. – vol. 2. – P. 139.
25. Kharitonov, S. Power analysis of a multimodular wind power system including PMG, active rectifier and VSI / S. Kharitonov, S. Brovanov, G. Zinoviev // Proc. international conference-workshop compatibility and power electronics. – Tallinn, 2011. – P. 78-85.
26. M. K. S.-A., Zidi. Dynamic Performance Of a Back-To-Back HVDC Station Based on Voltage Source Converters / Zidi M. K. S.-A., Fella S. H. M.-K. // Journal of electrical engineering. – 2010. – vol. 61. – P. 29-36.
27. Portillo, R. C. Modeling strategy for back-to-back three-level converters applied to high-power wind turbines / R. C. Portillo, M. M. Prats, J. I. León, J. A. Sanchez, J. M. Carrasco, E. Galvan // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2006. – vol. 53. – P. 1483-1491.

28. Механізація переробки і зберігання плодоовочевої продукції: Навч. посібник / О. В. Дацишин, О. В. Гвоздєв, Ф. Ю. Ялпачик, Ю. П. Рогач; За ред. О. В. Дацишина — К.: Мета, 2003. — 288 с.: іл.
29. Перспективи і напрямки розвитку сучасного механізованого сільськогосподарського виробництва (Частина I «Сучасні напрямки розвитку технологій в рослинництві»): Методичні вказівки по вивченню дисципліни та виконанню практичних робіт / Середя Л.П.,— Вінниця РВВ ВНАУ, 2020. – 128 с.
30. Д.Г. Войтюк Сільськогосподарські та меліоративні машини / Д.Г. Войтюк В.О. Дубровін, Т.Д. Іщенко та ін.; За ред. Д.Г. Войтюка. К.: Вища освіта, 2004. 544 с.; іл.
31. А.с. 1631342 СРСР, МПК G01M 17/00. Стенд для випробування транспортних засобів / Т. П. Русадзе, Р. Б. Джануашвілі, Г. А. Николеїшвілі і ін.. -№4398364; заявл. 29.03.1988; опубл. 22.02.1990. ; Бюл. № 6.
32. Конспект лекцій з дисциплін «Автоматизація технологічних процесів та установок» і «Автоматизація технологічних процесів» (для студентів 4 – 5 курсів усіх форм навчання за напрямом підготовки 0922 (050702) – «Електромеханіка») / Авт.: Єсаулов С.М., Бабічева О.Ф. – Х.: ХНАМГ, 2009. - 78с.
33. Заполовський М.Й. Синтез управлінь для оптимізації динамічних процесів електроприводу змінного струму / М.Й. Заполовський, В.В. Скороделов, М.В. Мезенцев // Системи управління, навігації та зв'язку. –Вип. 4(50). Полтава. 2018. С. 38-41.
34. Грибко В.В. Мікропроцесорні системи керування електроприводами / В.В. Грибко, В.Ю. Кучерук, О.М. Возняк – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 146 с.
35. Поповіч М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М.Г. Поповіч, О.Ю. Лозинський. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
36. Калетнік Г.М., Скорук О.П., Токарчук Д.М. Інженерний менеджмент. Методичні вказівки до виконання курсової роботи для студентів факультету механізації сільського господарства спеціальності 8.091902 „Механізація

сіського господарства” форма навчання денна і заочна – Вінниця: ОЦ
ВДАУ, 2009. – 68 с

37. Методичні рекомендації написання та оформлення дипломних робіт
для студентів денної та заочної форм навчання факультету механізації
сіського господарства освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» / [Середа
Л.П, Швець Л.В, Гунько І.В, Пришляк В.М.]. – Вінниця.: 2015. – 23 С.