

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 631.371:621.31

**ПОГОДЖЕНО**

Директор ІНІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження

Капун В.В.

(підпис)

2021 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри  
електротехніки, електромеханіки та  
електротехнологій

Жильцов А.В.

(підпис)

2021 р.

**КОМПЛЕКСНА МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА  
РОБОТА**

на тему: „**ОБРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО  
КОМПЛЕКСУ МАЛОЇ МЕХАНІЗАЦІЇ НА БАЗІ МІНІ-ТРАКТОРА**”

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., професор

(науковий ступінь та вчене звання)

Жильцов А.В.

(підпис)

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

Синявський О.Ю.

(підпис)

(ПІБ)

Виконав

Пасось В.Р.

(підпис)

(ПІБ)

КИЇВ – 2021

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри  
електротехніки, електромеханіки та  
електротехнологій

д.т.н., проф.

Жильцов А.В.

(підпис)

2021 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ  
РОБОТИ СТУДЕНТУ

Пасою Владиславу Руслановичу

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи роботи: „Обґрунтування параметрів  
електротехнічного комплексу малої механізації на базі міні-трактора”

затверджена наказом ректора НУБіП України від 1.02.2021 № 175”С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 15. 11. 2021

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи

«Правила улаштування електроустановок»; «Правила технічної експлуатації  
електроустановок споживачів»; «Правила безпечної експлуатації  
електроустановок споживачів».

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести огляд історії розвитку, стану та перспективи застосування  
електромобільної техніки.
2. Виконати дослідження об'єкту проектування – міні-трактора Беларус-132Н та  
визначити стратегію керування.
3. Обґрунтувати параметри електротрактора.
4. Визначити раціональні параметри електротрактора.
5. Розробити систему керування електротрактором.
6. Провести техніко-економічне обґрунтування застосування електротрактора.

Дата видачі завдання 02.02.2021 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Синявський О.Ю.

(підпис)

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

Пасось В.Р.

(ПІБ)

(підпис)

## Реферат

Дана комплексна магістерська робота складається з 33 сторінок, 17 ілюстрацій, 1 таблиці, 14 джерел.

**Мета досліджень** – підвищення енергоефективності електропривода міні-трактора за рахунок оптимізації його електричних параметрів і режимів роботи.

**Об'єкт досліджень** - процеси електромеханічного перетворення енергії в електроприводі електротрактора.

**Предмет дослідження** - закономірності зміни параметрів та режимів роботи електропривода електротрактора.

**Методи дослідження та апаратура:** моделювання, методи математичної статистики, теорії планування експерименту, теорії електричних машин, теорії електропривода та ін., амперметри, вольтметри.

Наведена історія застосування електромобільної техніки.

В другому розділі наведено загальний вигляд переробляемого міні-трактора Беларус 132Н, досліджено принцип роботи безколекторного двигуна, схема управління, та програмування контролера VEC-500.

В третьому розділі досліджено вплив експлуатаційних показників та тягових характеристик на параметри регулювання, розрахункову і номінальну потужності приводного електродвигуна.

**Галузь застосування** – сільськогосподарське виробництво.

**Ключові слова:** обробіток ґрунту, електротрактор, тягова характеристика електротрактора, система керування, тяговий двигун



ВСТУП	5
1. Історія розвитку, стан та перспективи застосування електромобільної техніки	7

2. Технологічна частина	13
2.1 Загальний опис міні-трактора Беларус-132Н	13
2.2 Принцип приводу двигуна BLDC і стратегія управління	14

3. Обґрунтування параметрів електротрактора	
3.1 Аналіз тягових характеристик і параметрів регулювання електромотоблока	
3.2 Розрахунок потужності і вибору тягового електродвигуна електротрактора	
3.3 Теоретичні дослідження характеристик регулювання тягового електродвигуна	

4. Експериментальні дослідження	
4.1 Визначення раціональних параметрів електротрактора	
4.2. Аналіз результатів визначення раціональних параметрів електротрактора	

5. Розроблення системи керування електротрактором	
5.1 Система управління електричним трактором	17
5.2 Програмування контролера VEC-500	20

6. Визначення економічної ефективності електротрактора	
--	--

ВІСНОВКИ	31
----------	----

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	32
----------------------------	----

НУБІП України

## ВСТУП

За за останні роки в Україні значно зросла кількість фермерських господарств та приватних землекористувачів. Водночас значного розвитку набуло овочівництво на заповідних ґрунтах. З метою підвищення ефективності овочівництва набули поширення невеликі мобільні агрегати вітчизняного та зарубіжного виробництва у вигляді блоків двигунів і мінітракторів з двигунами внутрішнього згоряння (ДВС). Загалом блоки двигунів з двигунами внутрішнього згоряння виділяються як ефективний засіб дрібної механізації трудомістких процесів, особливо основного процесу сільського господарства. Однак робота міні-тракторів з двигунами внутрішнього згоряння в теплицях підвищує рівень шуму та забруднення повітря, що негативно впливає не тільки на людей, а й на рослини.

Попередні дослідження показали, що мобільні агрегати з тяговими двигунами (TED) перспективні для експлуатації в закритих наземних спорудах, які є екологічно чистими агрегатами, які не страждають від вищезазначених недоліків. Крім того, заміна двигуна внутрішнього згоряння з некерованим електроприводом на асинхронний двигун не забезпечує необхідного діапазону регулювання швидкості агрегату та високої енергоефективності малого електротрактора.

У південному регіоні України дослідження такої енергійної техніки обробку ґрунту є важливим.

*Мета дослідження* - Підвищення енергоефективності електроприводу міні трактора за рахунок оптимізації його електричних параметрів та режимів роботи.

*Предмет дослідження* - Процеси електромеханічного перетворення енергії в електроприводі електротрактора.

*Предмет дослідження* - Зміна закономірностей параметрів і режимів роботи електроприводу електротрактора.

*Фокус дослідження:*

1. Аналіз існуючих конструкцій електротракторів та способів їх електропостачання.
2. Оптимізувати потужність і лінійну швидкість електротрактора з урахуванням критерію оптимізації – тягової сили трактора.
3. Дослідити властивості регулювання та обґрунтувати режими керування приводним двигуном електротрактора.
4. Встановити систему керування приводом електродвигуна трактора.
5. Провести техніко-економічну оцінку електричного букейра.

Брав участь у Всеукраїнському студентському науковому конкурсі 2020/2021 у м. Кам'янське на тему «Вплив якості електроенергії на електроприводи в сільськогосподарській техніці» та отримав там II ступінь.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ, СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

Якщо звернутися до історії механіки сільгосптехніки в нинішньому столітті, не варто забувати про видатні досягнення місцевих конструкторів, які продовжували працювати в галузі мобільної сільськогосподарської техніки для сільського господарства. Серед цих робіт особливе місце займають дослідження щодо використання електроенергії для забезпечення руху сільськогосподарської техніки. Знання історії теми дає змогу провести паралелі між вчорашнім і сьогоднішнім днем, перехопити позитивний досвід наукових шкіл та підтримати методологічні засади відомих учених.

З початку ери машинного землеробства тягу забезпечували трактори з двигуном внутрішнього згорання (ДВС). Однак майже одночасно з розвитком традиційних тракторів з'явилася велика кількість машин, в яких тягну силу створювали електродвигуни. Фактично ці машини були прототипами нових технічних засобів, розроблених в електролебідках і електротракторах.

У електричних лебідок двигун встановлювався стаціонарно, а плуг приводився в рух тросом. В електротракторах двигун розташований на самохідному шасі, яке рухається по полю і переміщує плуг.

Найперспективнішим напрямком є розвиток електротракторів. На відміну від електричних лебідок, трактори мають більшу маневреність і універсальність.

У Радянському Союзі наприкінці 1920-х років робилися спроби побудувати дротовий електротрактор, а з 1930 по 1956 рр. було розроблено та випробувано понад двадцять конструкцій провідних електротракторів змінного та постійного струму. Замість традиційного двигуна

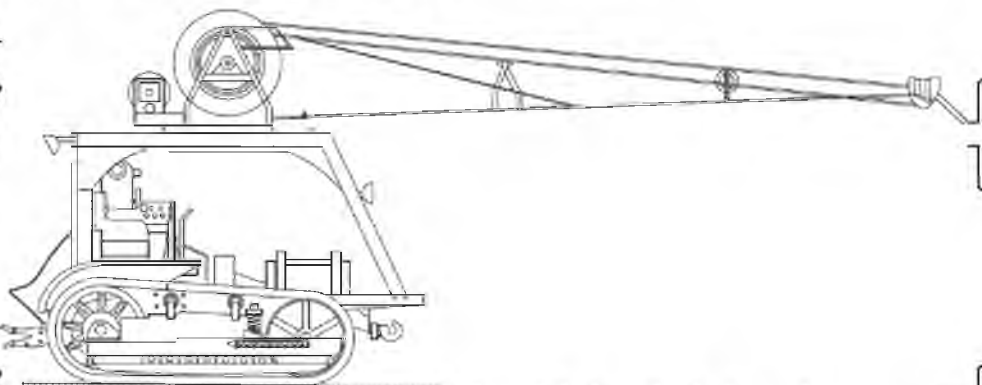
внутрішнього згорання на шасі трактора встановили електродвигун і спеціальні пристрої, які дбають про намотування і розмотування кабелю. Крім



того, до складу блоків входили пантографи, блоки управління, пересувні підстанції та повітряні лінії електропередач.

Основними перевагами електротракторів були:

- Постійна готовність до роботи, швидке включення і виключення, незалежність від температури навколишнього середовища;
- висока короточасна перевантаження електродвигуна;
- значна економія праці в екіпажах електротракторів, більший ресурс двигуна (кілька десятків тисяч годин проти тисяч годин для двигуна внутрішнього згорання);
- постійна потужність електродвигуна після ремонту;
- Ефективність (середнє споживання електроенергії 45 кВт·год на 1 га м'якої ґранки);
- Екологічно чистий, без шуму.



Боягузливий. 1.1 - Конструкція електротрактора

Для підхоплення троса на трактор використовувалася стріла з тросовим барабаном. При транспортуванні мобільного електроблоку на пересувну підстанцію кабель за допомогою спеціального електродвигуна намотували на барабан і розмотували при русі в зворотному напрямку. Кабелпримальна стріла піднімалася над кабіною електроблоку і використовувалася не тільки для притягування кабелю, а й для електробезпеки та відведення від укрупненої сільськогосподарської техніки та обладнання (рис. 1.1).

Перша конструкція електричного гусеничного трактора була розроблена на базі дизельного трактора ЧТЗ-60. Потужність електродвигуна становила 35

кВт при напрузі 1000 В. Електродвигун трактора живився по гнучкому шланговому кабелю довжиною 800 м, поворотна стріла піднімала трос над трактором і розміщувала його на відстані вгору, до 5 м від борозни видалають.

Ця конструкція електротрактора виявилася непрацездатною через свою технічну недосконалість.

Перший працюючий електротрактор під маркою ВІМЕ-2 з'явився в 1937 р. Ця конструкція була створена також на базі трактора ЧТЗ-60, в якому двигун внутрішнього згоряння приводиться в рух електричним трифазним двигуном потужністю . Замінено 48 кВт на 500 В. Над двигуном встановлено кабельний барабан з 750 м гнучкого кабелю з гумовою ізоляцією)

Позитивні результати роботи електротракторів ВІМЕ-2 цього року довели технічну доцільність практичного використання електротракторних машин у польових умовах. Працює з використанням кабельного живлення.

Основні переваги електротрактора в порівнянні з трактором з термо двигун такий: хороші тягові властивості і надійна тяга

Електричний двигун; простота обслуговування та введення в експлуатацію, економія часу та праці через необхідність транспортування, а також заправки та води.

Недоліками електротракторів порівняно з дизельними є: великі початкові інвестиції; трохи менша маневреність за рахунок троса, в цей час, можливо, недостатня довговічність силового кабелю, а також його висока вартість по відношенню до вартості всього електротрактора; збільшення ваги електротрактора в порівнянні з трактором на 1-2 т, викликане вагою конструкції барабанної групи, електроприводом для намотування троса і великою кількістю шківів, необхідних для наведення троса на барабан.

Сільськогосподарська техніка наразі стикається з можливістю переходу на інші альтернативні види палива, щоб стати більш екологічно чистими та зменшити витрати на паливо.

Незважаючи на труднощі, виробники сільгосптехніки продовжують удосконалювати силові установки і розглядають як варіант використання повністю електричних силових установок, встановлених на самохідній сільськогосподарській техніці.

Тому дослідження на даний момент є актуальними

Докази робочих параметрів тракторів з двигуном з використанням електростанції для техніко-економічної оцінки під час експлуатації технологічних процесів.

За кордоном виробники автономних і електричних тракторів, які не вимагають участі водія в обробці полів, привертають широку увагу фермерів на великих міжнародних виставках. Однією з подібних розробок нещодавно була представлена концепція силового агрегату від найбільшого у світі виробника сільськогосподарської техніки John Deere, який представив прототип електротрактора.



Боягузливий 1.2 - електротрактор John Deere SESAM

Оснащений 130 кВт. Оснащений моделлю SESAM 130 кВт \* год, в якій використовується тільки електриввід - замість дизельного двигуна під капотом встановлені батареї 130 кВт \* год і два електродвигуни

150 кВт. На відміну від своїх дизельних побратимів, трактор практично безшумний, а електричну модель легше ремонтувати, оскільки в ній менше деталей.



Фермери також можуть заощадити паливо. На даний момент повністю заряджений акумулятор забезпечує приблизно 4 години роботи або запас ходу приблизно 55 км за нормальних умов експлуатації. Час його зарядки становить близько 3 годин. Час роботи акумулятора становить приблизно 3100 циклів.

Серед найпопулярніших моделей таких агрегатів українська версія ХТЗ «Едісон». Він має ємність 40 літрів, с, має задній привід і акумулятори на 24 кВт.



Боягузливий. 1.3 - Електротрактор ХТЗ «Едісон»

ХТЗ Едісон розроблений спільно з компанією «АвтоЕнтерпрайз» на базі серії ХТЗ-3512 і на сьогоднішній день не має аналогів у всьому світі. Для повної зарядки акумуляторів потрібно від 2 до 4 годин від зарядного пристрою та від 8 до 10 годин від мережі 220 В. 4 години роботи.

При цьому, використовуючи вітчизняний та зарубіжний досвід у сфері накопичення електроенергії в АІТ, стає можливим випробування та використання електростанції на цьому тракторі, що підвищує ефективність передачі електроенергії до органів, яка в даний час є вивчається.

Впровадження технологічних процесів у заводське виробництво трактора, оснащеного електростанцією, повинно заощаджувати нафтопродукти, покращувати навколишнє середовище, виключати технічні викиди, раціонально використовувати графік навантажень на електромережу навесні та влітку, автоматизувати і вдосконалювати технологічні процеси.

Сільськогосподарське машинобудування повільно, але впевнено переходить в еру електричної сільськогосподарської техніки, яка поступово проникає в сільське господарство і кардинально змінить його в майбутньому..

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

## 2.1 Загальний огляд мінітрактора Білорусь-132Н

Ця складна магістерська робота присвячена переобладнанню мінітрактора Беарус-132Н з двигуна внутрішнього згоряння (ДВС) на безщітковий двигун постійного струму.



### Боягузливий. 2.1.1 - Загальний вигляд мінітрактора Білорусь-132Н

Мінітрактор Білорусь-132Н призначений для виконання різноманітних сільськогосподарських робіт складною, напівнавісною, причіпною та стаціонарною технікою та інструментом: оранка легких ґрунтів, борони, рілля, міжрядний обробіток картоплі та буряків, внесення мінеральних добрив, скошування трави, очищення доріг і територій від сміття та снігу, засипання ям і котлованів, заготівлі сіна, транспортування вантажів, стаціонарні роботи з приводом ВОМ, а також для використання в садах і садах, присадибних ділянках тощо для транспортування вантажів, а також для різноманітної роботи зі стаціонарними агрегатами та агрегатами з приводом від потужності, наприклад, деревообробні агрегати, насоси.

Цей міні-трактор дозволяє встановити безщітковий електродвигун потужністю 3 кВт на базі контролера VEC від Golden Motors з контактором л такам акумуляторсм 48 В

## 2.2 Принцип роботи двигуна BLDC і стратегія управління



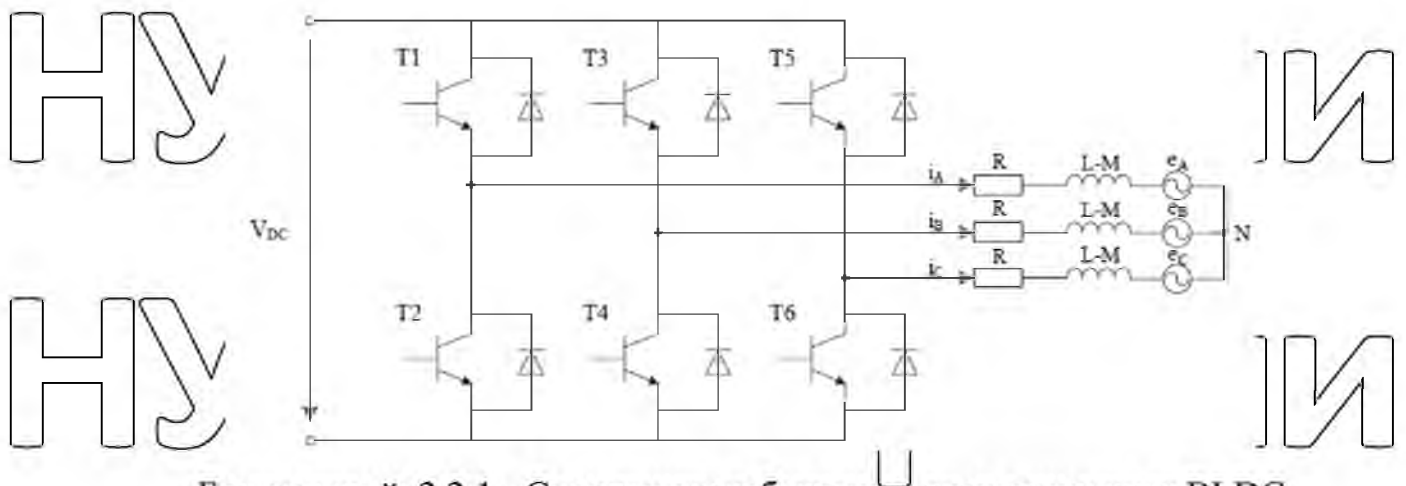
Електродвигун клапана (безщітковий, безщітковий) являє собою синхронний двигун за принципом частотного регулювання з самесинхронізацією, ядром якого є управління вектором магнітного поля статора в залежності від положення ротора. Клапанні двигуни (в англійській літературі BLDC або PMSM) ще називають безщітковими двигунами постійного струму, оскільки на колектор такого двигуна зазвичай живиться напруга постійного струму.

Безщітковий двигун постійного струму (BLDC) широко використовується в автомобільній промисловості та пропонує переваги високої ефективності, високої щільності потужності, сильного переваження та високого пускового моменту.

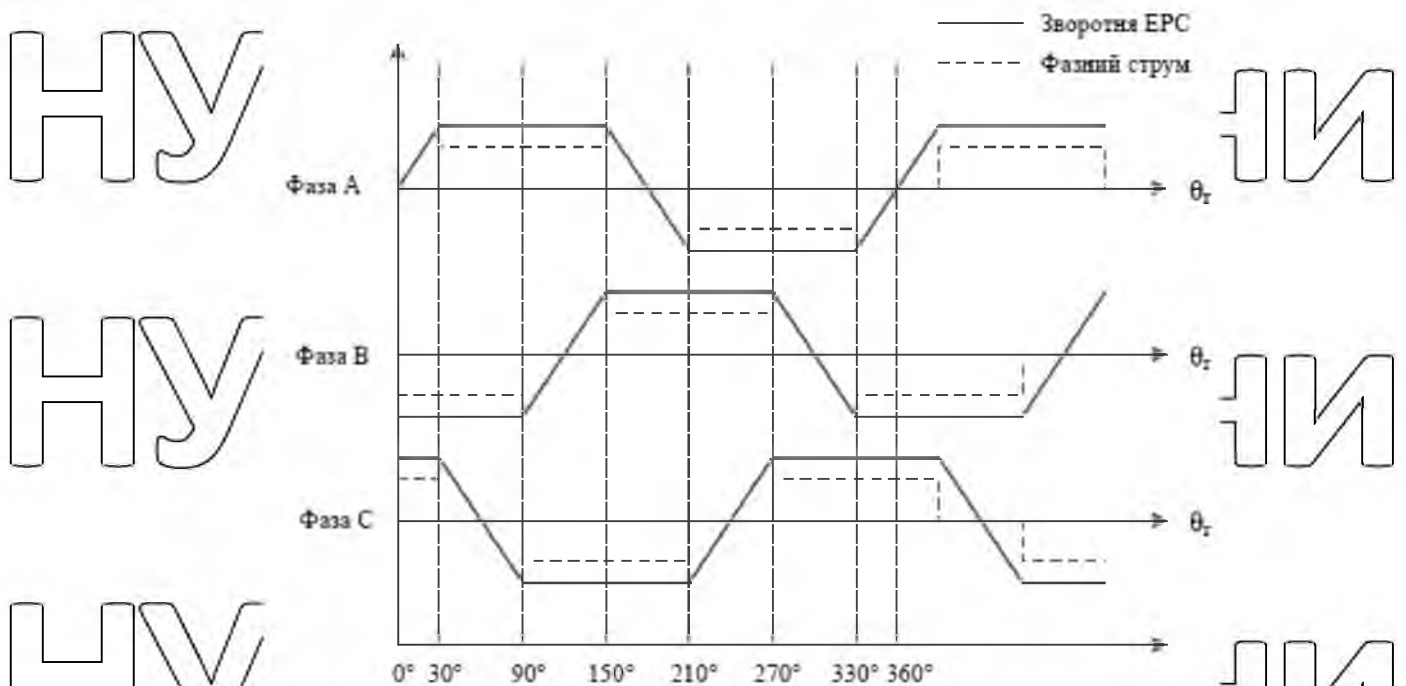
Двигун BLDC розроблений за принципом звичайного двигуна постійного струму з електронним перемиканням замість механічного, тому він має просту конструкцію і вимагає меншого обслуговування. Ці переваги відповідають технічним вимогам до приводу електротрактора.

Двигун BLDC заснований на електронній схемі. Як і на рис. 2.3.1, статор двигуна з трифазною обмоткою з'єднаний з трифазним джерелом інвертором з шістьма вимикачами. Датчики Холла використовувалися для визначення положення ротора двигуна та передачі сигналів положення. Оскільки перетворювач зазвичай вмикався або вимикався, трифазні обмотки статора двигуна були з'єднані послідовно і створювали обертове магнітне поле для приводу ротора двигуна.

Типові форми сигналів зворотної ЕРС і фазного струму трифазного електродвигуна BLDC показані на рис. 2.2.2, вісь X якого відображає кут повороту ротора двигуна. Зворотна ЕРС на фазу була приблизно постійною для 120 електричних градусів, прямі і зворотні 60 електричних градусів яких були лінійними з кутом ротора. Для підтримки стабільної швидкості та крутного моменту фазні обмотки могли пропускати струм лише під час плоскої частини зворотної ЕРС. Тому двигун перемикається між фазними обмотками кожні 60 електричних градусів.



Боягузливий, 2.2.1 - Схематичне зображення електропривода BLDC



Боягузливий, 2.2.2 - Типова форма хвилі трифазного двигуна BLDC із зворотною ЕРС та фазним струмом.

Двигун був увімкнений за допомогою 2 перемикачів, один на стороні високого рівня, а інший на стороні низького рівня. Тому дві фази обмотки були з'єднані послідовно через шину постійного струму. Кожен перемикач двигуна змінює стан одного з перемикачів, тому кожен перемикач залишається увімкненим протягом 120 електричних градусів. Послідовність перемикачів в 360-градусному електричному циклі була: T1T6-T3T6-T3T2-T5T2-T5T4-T1T4-T1T6, як на рис. 2.2.1. Для правильного перемикачів необхідно точно визначити положення ротора. Для визначення положення



ротора використовувалися датчики Холла. Їх встановили з різницею фаз 120 градусів. Кожен датчик підтримував високий рівень протягом 180 електричних градусів за цикл, як на рис. 2.2.3, в ось X якого представляє кут повороту ротора. Кожен датчик Холла надіслав двійкове число одночасно, так що в циклі на 360 градусів є шість станів. Стан датчиків Холла та відповідних активних перемикачів був таким, як показано в таблиці 1

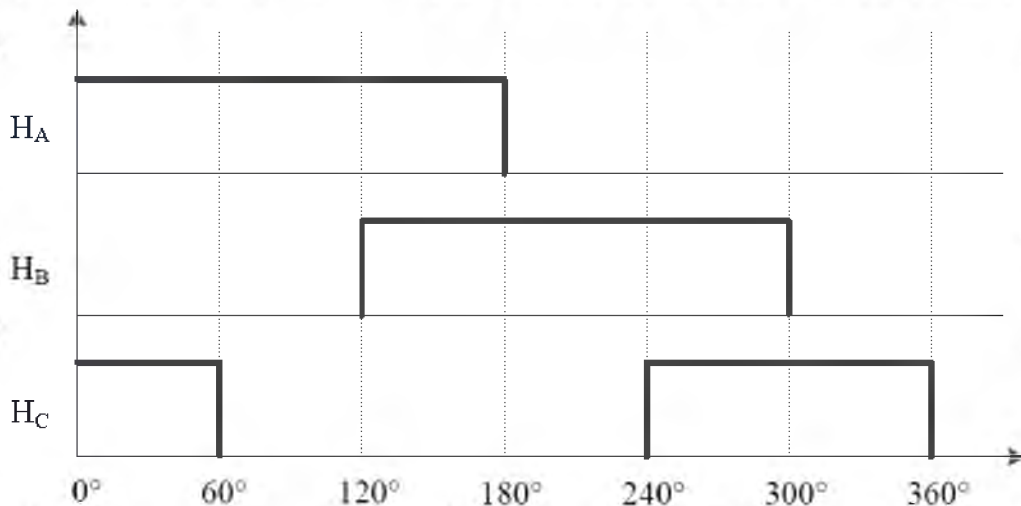


Рис. 2.2.3 - Датчики Холла видають сигнали в циклі 360 електричних градусів

Таблиця 1. Стан датчиків Холла та відповідних перемикачів

Датчики Холла			лічильник		Фазні обмотки двигуна		
Ha	Людина	Hc	Висока сторона	Низька сторона	Поточний напрямок		
					фаза I	фаза IN	фаза 3
1	0	1	T1	T4	+	-	кінець
1	0	0	T1	T6	+	кінець	-
1	1	0	T3	T6	кінець	+	-
0	1	0	T3	T2	кінець	+	-
0	1	1	T5	T2	-		+
0	0	1	T5	T4	кінець	0	+

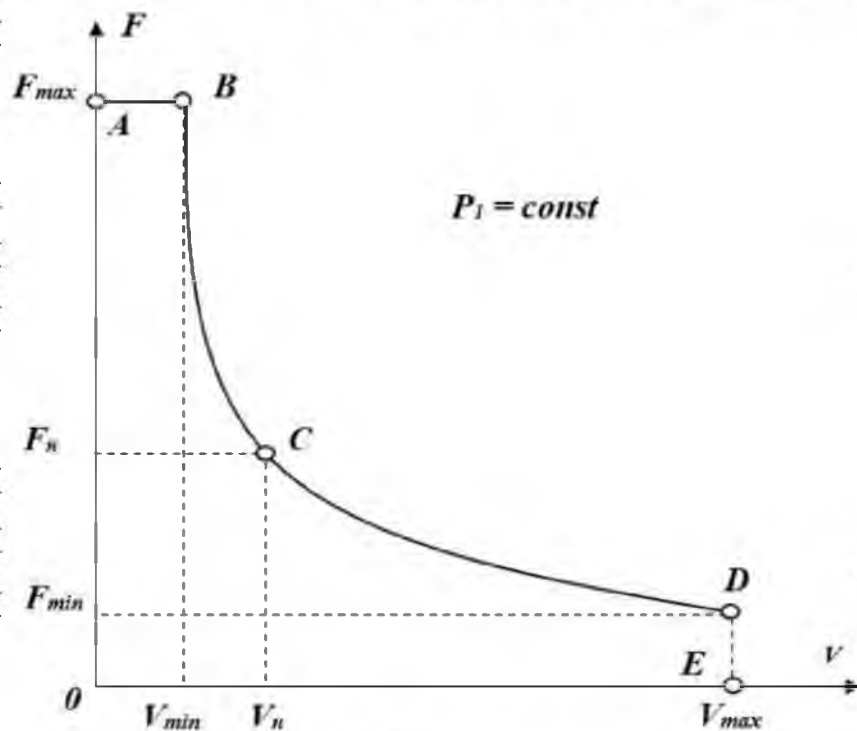
### РОЗДІЛ 3

## УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ЕЛЕКТРОТРАКТОРА

### 3.1 Аналіз тягових властивостей і контрольних параметрів електричного буксира

Тягова характеристика електричного буксира з електроприводом, а також інших рухомих силосових засобів являє собою залежність тягової сили ( $F_m$ ), що розвивається електробуксиром, від швидкості руху ( $v$ ) при постійному підключеному навантаженні ведучого електродвигуна. (P1).

Узагальнена гранична тягова характеристика електрифікованих транспортних засобів наведена на рис. 1. 3.1 [20, 21]



Боягузливий. 3.1 Узагальнена гранична тягова характеристика електричного буксира

Основним завданням тягового двигуна в приводі електротрактора є вироблення тягової характеристики з необхідною віддачею енергії.

З урахуванням можливих режимів роботи тягового двигуна характеристична крива виділяє три основні ділянки за сталістю максимальної

тяги ( $F_{max}$ ) (лінія АВ), постійної потужності ( $P_1$ ) (ділянка BCD) і максимальної швидкості ( $V_{max}$ ). Область, на якій забезпечується режим сталості потужності  $P_1 = const$ , має форму гіперболи і містить дві характерні зони: короткочасну роботу в режимі сталості потужності  $P_1$  (лінія BC) і зони довготривалої роботи з  $P_1 = const$  (CD лінія). Точки B і D — межі, при яких електротрактор переходить у режим підтримки постійної потужності (B) і сталості максимальної швидкості (D).

Номінальною величиною сили розтягування  $F$  є сила, яка забезпечує рух електробуксирника з повною розрахунковою масою при заданій номінальній швидкості  $v_n$ . Тягове зусилля коливається від  $F_{max}$  до  $F_{min}$ , а швидкість від  $v_{min}$  до  $v_{max}$  залежить від багатьох факторів: глибини обробітку ґрунту, ширини захвату, величини необхідної тяги  $F$  для оранки важких ( $F_m$ ), середніх ( $F_c$ ) і легких ґрунтів, вологість ґрунту та ін.

Електротрактори в умовах навантаження можуть працювати з потужністю  $P < P_{1n}$ . Це означає, що пристрій обробляє часткову тягову характеристику в діапазоні 0ABCDE разом з граничною тяговою характеристикою при  $P_1 = P_{1n}$  (рис. 3.1). Сімейство часткових тягових характеристик  $P(V)$  показано на рис. 3.2, а, б, в, з можливістю отримання як максимального тягового зусилля, так і максимальної швидкості в різних комбінаціях при черпанні від електромережі  $P_1 < P_{1n}$ . Необхідність регулювання тягового зусилля за характеристиками на рис. 3.2 в основному обумовлена технологічними циклами блоку електродвигуна та умовами його роботи. Реалізація часткових тягових характеристик різних типів забезпечується відповідним керуванням приводним двигуном [26,27,31].

НУБІП

аїни

НУБІП

аїни

НУБІП

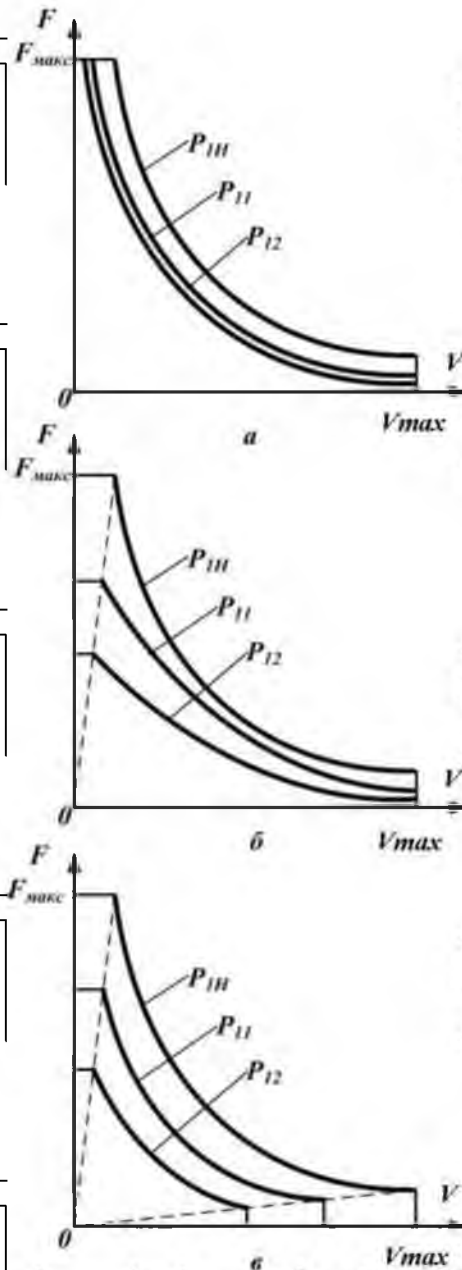
аїни

НУБІП

аїни

НУБІП

аїни



Боягузливий 3.2 Тягові характеристики електротрактора: P<sub>III</sub> > P<sub>II</sub> > P<sub>I2</sub>

НУБІП

україни

За тяговою характеристикою блоку двигуна P (V) (рис. 2.1) можна отримати механічні властивості тягового двигуна блоку двигуна, тобто залежність електросмагнітного моменту від кутової швидкості M (ω) використовуючи такі співвідношення [41,50,123,1]:

$$\omega = \frac{i_p \cdot i_n}{R_k} \cdot V, \tag{3.1}$$

НУБІП

україни

$$M = \frac{R_k}{i_p \cdot i_n \cdot \eta_p \cdot \eta_n \cdot \eta_k} \cdot F_m; \quad (3.2)$$

де  $F_t$  - сила розтягування, Н;

$V$  - лінійна швидкість, м/с;

$R_k$  - Радіус кочення колеса мотоблока, м;

$i_p$ ;  $i_n$  - Коефіцієнт передачі і ККД;

$i_p$ ;  $\eta_n$  - Передаточне число і ефективність ланцюгової передачі (якщо є на додаток до коробки передач);

$\eta_k$  - Ефективність велосипеда.

Механічна характеристика  $M(\omega)$  приводного електродвигуна сконструйованого таким чином електротрактора наведена на рис.2 3.3. Зауважимо, що крива механічної характеристики містить три ділянки:

постійність пускового моменту  $M_n = M_{tah} = \text{const}$  - лінія АВ; Сталість

споживаної електродвигуном потужності  $P_1 = \text{const}$  - крива ВСD; Обмеження

швидкості  $\omega_{tah} = \text{const}$  - лінія DE. Координати точок В ( $M_{tah}$ ;  $\omega$ ); С ( $M_n$ ;  $\omega_n$ ) і D ( $M_{tip}$ ;  $\omega_{tah}$ ) через механічні властивості тягового двигуна (TED)

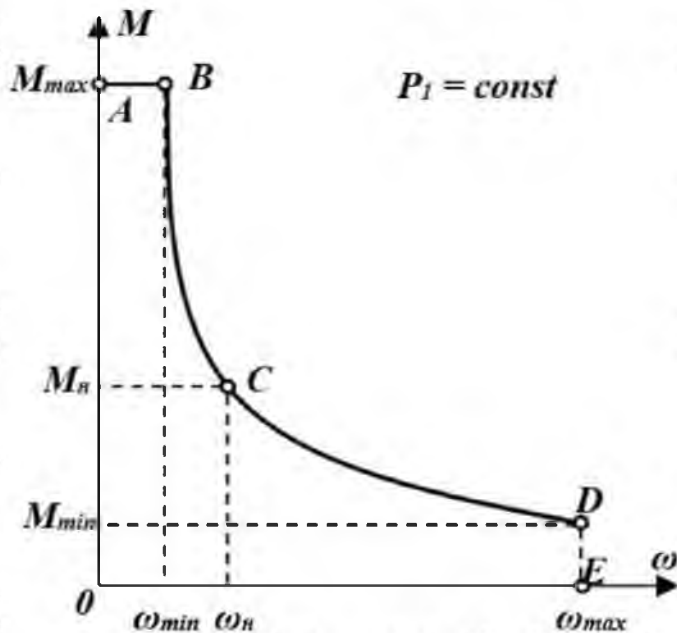
чітко визначають кратність максимальної швидкості  $K_\omega = \omega_{tah} / \omega_n$ , кратність

максимального крутного моменту  $K_m = M_{tah} / M_n$ - або TED -

Перевантажувальна здатність і номінальний режим навантаження в точці С з координатами  $M_n$  і  $\omega_n$ .

НУБІП України

НУБІП України



Боягузливий 3.3. Механічні властивості приводного електродвигуна електротрактора

3

$$K_{\omega} = \omega_{max} \quad \omega_n = K_n = n_{max} \quad n_n = K_v = V_{max} \quad V_n, \quad (3.3)$$

тобто коефіцієнти зміни кутової швидкості  $K_{\omega}$  і швидкості  $K_v$  тягового двигуна, а також швидкості руху  $V_n$  електротрактора мають однакові значення. Механічні властивості є законом керування тяговим двигуном електричного буксира. При реалізації граничних залежностей  $V(V)$  і  $M(\omega)$  тяговий двигун приймає номінальне приєднане навантаження  $P_n$  від електромережі. Для практичної реалізації закону керування тяговим двигуном, який визначається характеристичною кривою  $M(\omega)$ , наведеною на рис.3.3, рекомендується використовувати тяговий двигун, механічні властивості якого близькі до гіперболічних залежностей з цей метод контролю. для тягових електродвигунів пересувних транспортних засобів (електрокоробок локомотивів, електротракторів).

Функціональні залежності  $U(I)$ , отримані шляхом перетворення рівнянь на рис. 3.3 та рівнянь, що визначають властивості двигуна в усталеному режимі [70,84]



$$U = E_a + IR_a; E_a = k\Phi\omega;$$

$$M = k\Phi I; \omega = \frac{U - IR_a}{k\Phi}, \quad (3.4)$$

де  $E_a$  – ЕРС якоря;

$M$  - електромагнітний момент;

$\Phi$  - магнітна річка;

$R_a$  - опір в ланцюзі якоря;

$k$  - конструкторна сталь.

У цьому випадку для двигуна постійного струму з послідовним збудженням

$$R_a = R_{я} + R_{об} + R_{щ} + R_{зб}, \quad (3.5)$$

де  $R_{я}$  - ЕРС;  $R_{об}$  - або опір обмотки якоря, обмотки додаткових полюсів, перехідного щіткового контакту і обмотки послідовного збудження.

Для розрахунків та аналізу тягових властивостей ми використовуємо такі параметри ТЕД постійного струму у відносних одиницях: потужність, споживана двигуном від мережі  $P_* = P_1 / P_{1н}$ ; Напряга живлення  $U_* = U / U_n$ ;

Струм якоря  $I_{a*} = I_a / I_n$ ; електрорушійна сила  $E_* = E / U_n$ ; Кутова швидкість

$\omega_* = \omega / \omega_n$ ; швидкість  $n_* = n / n_n$ ; електромагнітний момент  $M_* = M / M_n$ ;  
Корисна потужність на валу  $P_{2*} = P_2 / P_{2н}$ ; Показник продуктивності

$\eta = P_2 / P_1 = P_{2*} / P_{1*}$ ; магніторушійна сила збудження  $F_{зб*} = F_{зб} / F_{зб.н}$ ; Струм

збудження  $I_{зб*} = I_{зб} / I_{зб.н}$ ; коефіцієнт загасання поля послідовного двигуна

збудника,  $\beta = I_{зб} / I_a = I_{зб*} / I_{a*}$ ; магнітна річка  $\Phi_* = \Phi / \Phi_n$ , а також наступні

відносини

$$I_{max*} = I_{max} / I_n = K_m \Phi_*; \quad (3.6)$$

$$M_* = \Phi_* \cdot I_*, \text{ звідки } I_* = M_* / \Phi_*; \quad (3.7)$$

$$P_{I*} = U_* \cdot I_* = P_I \quad P_{In}, \text{ звідки } I_* = I \quad U_* \quad (3.8)$$

$$P_{розр} = P_n \cdot K_\omega \approx M_n \cdot \omega_{max} \quad (3.9)$$

Рівняння (3.4 ... 3.6) також можна використовувати для визначення параметрів тягового двигуна постійного струму у вузлах тягової характеристики  $M(\omega)$ , які наведені на рис. 3.3. Вважаємо, що значення напруги  $U = U_n$  і струму  $I = I_n$  прийняті як номінальні, для режимів роботи ТРЕД за пунктами В і Д отримуємо

$$\begin{aligned} U_B = U_{min} &= E + IR_a = K\omega_B \cdot \Phi_B + IR_a; \\ U_D = U_{max} &= E + IR_a = K\omega_D \cdot \Phi_D + IR_a. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Оскільки згідно (3.4) у номінальному режимі

$$\begin{aligned} E_n &= K\omega_n \cdot \Phi_n, \text{ звідки } K = E_n / \omega_n \cdot \Phi_n; \\ M_n &= KI_n \cdot \Phi_n, \text{ звідки } K = M_n / I_n \cdot \Phi_n. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Після вставлення значень коефіцієнтів  $K$  в систему рівнянь (3.10) отримаємо

$$U_{min} = E_n \omega_{B*} \Phi_{B*} + K_M \Delta U_n / \Phi_{B*}; \quad (3.12)$$

$$U_{max} = E_n K_\omega \Phi_{D*} + M_{min*} \Delta U_n / \Phi_{D*}, \quad (3.13)$$

Де  $\Delta U_n$  - падіння напруги в ланцюзі якоря при  $I = I_n$ .

Після розв'язання (3.12) та (3.13) щодо параметрів керування  $K_M$  та  $K_\omega$  можна використовувати прийнятні методи керування рухом для реалізації закону керування  $M(\omega)$  і, відповідно, тягової характеристики  $F(V)$ .

Згідно (3.12) і (3.13) регулювання кутової швидкості  $\omega$  DPS відбувається раціонально шляхом зміни напруги на колекторі  $U$  та магнітного потоку  $F$ .

Основною потужністю електричного буксира, що впливає на вибір тягового двигуна, є його загальна маса  $G$ , кількість ведучих коліс  $tk$ , номінальна тяга  $F_n$  і швидкість номінального режиму  $u$ , які визначають приєднане навантаження  $P_I$  з тягового двигуна, максимальної тяги,  $F_{tah}$  і



швидкості  $V_{tah}$ . Ці показники встановлюються на початковому етапі розробки електротрактора за результатами аналізу заданих технологічних циклів та умов експлуатації. Показник  $F_n$  визначає вибір номінальної потужності ТЕД і можливість його тривалої роботи в умовах нагрівання, тому як номінальне значення для ТЕД має сенс вибрати тривалий режим [57-59].

Вимоги до ТЕД формуються з урахуванням параметрів граничної тягової характеристики  $F(V)$  (рис. 3.1). Загальна тяга  $F$  для постійної швидкості блоку двигуна може бути визначена співвідношенням [73,101,109,111]

$$F = G(\lambda\varphi + \xi f), \quad (3.14)$$

де  $G$  - робоча маса трактора, кН;

$\lambda$  - коефіцієнт навантаження на колесо (для гумових коліс  $\lambda = 1$ );

$(\varphi = 0,5 \dots 0,7$  - коефіцієнт зчеплення коліс з ґрунтом;

$\xi$  - коефіцієнт, що враховує внутрішні втрати в працюючій системі;

$f = 0,1 \dots 0,12$  - Коефіцієнт опору коченню коліс.

Гранична залежність  $P(V)$  електричного буксира може бути виражена рівнянням

$$F = P_{in}\eta_{\Sigma} / V, \quad (3.15)$$

де  $P_{in}$  - струм споживання з мережі при номінальному навантаженні;

$\eta_{\Sigma}$  - загальна ефективність руху;

3

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{en}\eta_{\sigma}\eta_p\eta_k, \quad (3.16)$$

де  $\eta_{en}$  - ККД клапанного перетворювача;

$\eta_w$  - ККД приводного електродвигуна;

$\eta_p$  - ефективність передачі;

$\eta_k$  - Ефективність велосипеда.

Для побудови граничної тягової характеристики потрібні значення кратності максимальної швидкості  $KV$  і переважувальної здатності  $KF$ .

Коефіцієнт  $KF$  зазвичай встановлюється в межах  $KF = 2,5 \dots 3,0$ , а значення  $KV = Kp = \text{bird}/\text{mon}$  забезпечується вибором ТЕД з відповідною кратністю максимальної швидкості птаха/пн. яка вказана в каталозі електрообладнання.

При рівномірному розподілі  $K\omega = KV$  і  $K_m = KF$  співвідношення однакове

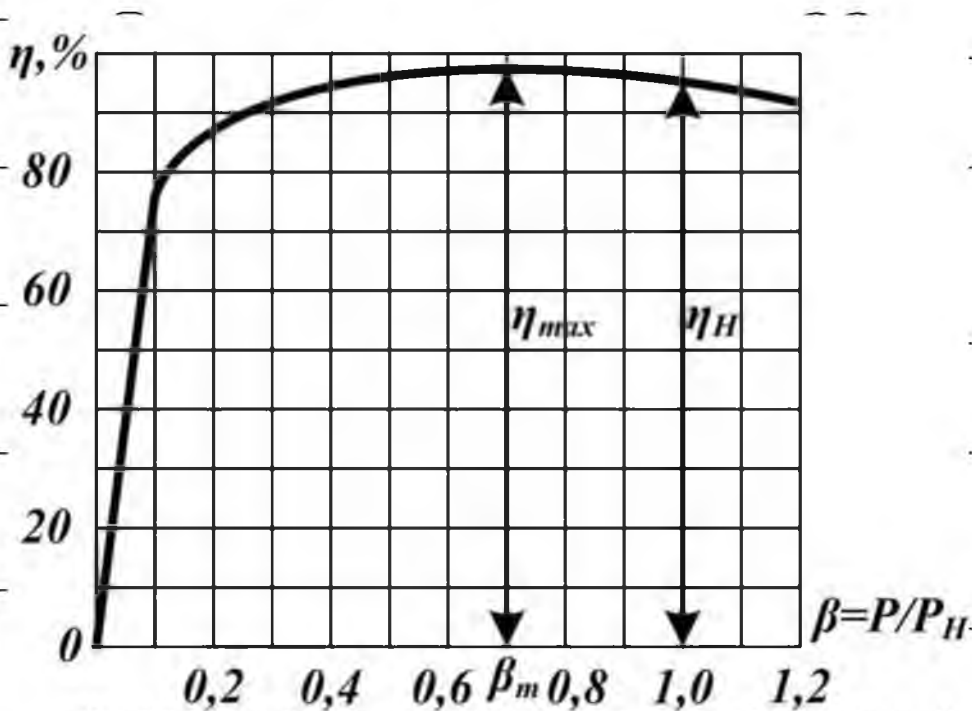
$$i_p = R_k \omega_{\max} / V_{\max} \quad (3.17)$$

Номинальна потужність ТЕД залежить від параметрів  $p$  і  $V$  тягової характеристики

$$P_n = F_n V_n / \eta_p \eta_k \quad (2.17)$$

Потужність електротрактора, а також його тягова характеристика  $F(V)$  і механічні параметри  $M(\omega)$  приводного двигуна дозволяють визначити керуючі параметри  $K\omega$ ,  $K_m$ ,  $U_{\text{tah}}^*$ ,  $I_{\text{tah}}^*$ ,  $F^*$ , розрахункові  $P_p$  і номінальний  $p_n$  потужності, що впливають на енергетичні, техніко-економічні показники, а також на вибір конструкції, номінальних даних і параметрів тягового двигуна.

Зразковий вигляд діаграми ефективності ТЕД показано на рис. 2.5



Боягузливий. 3.5. Діаграма ККД приводного електродвигуна блоку двигуна

Змінюючи коефіцієнт втрат  $\Delta P_c$  і  $\Delta P_v$ , можна забезпечити максимальну ефективність при різних навантаженнях. Якщо призначення ТЕД працює переважно при навантаженнях, близьких до номінальних, то економічно виправдано, щоб значення  $\beta_t$  було близьким до одиниці. Якщо двигун в основному розрахований на недовантаження, то в цьому випадку доцільно, щоб значення  $\beta_t$  було менше одиниці. Зазвичай ТЕД мають  $\beta_t = 0,8 \dots 0,85$

[64].

### 3.2 Розрахунок потужності та вибір приводного двигуна електротрактора

Вибір електродвигуна для приводу електропривода є однією з найскладніших і відповідальних завдань при створенні тягово-електроприводу тракторів, особливо на ранніх стадіях розвитку. Обраний двигун повинен забезпечувати заданий технологічний режим робочого органу трактора з високою енергетичною віддачею, відповідати розташуванню елементів конструкції трактора та умовам навколишнього середовища зі стандартним підігрівом.

Підбір серійних електродвигунів проводиться з урахуванням наступних показників:

- 1) вид струму;
- 2) напруга живлення;
- 3) виконання;
- 4) значення номінальної швидкості та допустимий діапазон змін швидкості;
- 5) конструктивно-кліматичне виконання;
- 6) енергетичні показники (ККД);
- 7) Розміри та вага.

Крім того, на вибір параметрів приводного двигуна впливає потужність електричного буксира, в тому числі: загальна маса ( $G$ ); Радіус приводу ( $R_k$ ); довга або номінальна тяга ( $F_n$ ) і швидкість тривалого режиму ( $V_n$ ), що визначає ефективну потужність ( $P_E$ ) TED; максимальна тяга ( $F_{max}$ ) і швидкість ( $V_{max}$ ), які визначаються на початковому етапі розвитку електроприводу трактора за результатами аналізу найбільш енергоємного енергопроцесу – оранки ґрунту.

ТЕД обирається в такому порядку:

- 1) Розрахунок потужності та попередній підбір двигуна;
- 2) перевірити двигун за умовами пускової та перевантажувальної здатності;
- 3) Тестування прокип'ятого двигуна в умовах нагріву.

Також зверніть увагу, що вибір потужності, кутової швидкості, основних розмірів TED і передавального числа неоднозначні. Оскільки вони є взаємозалежними параметрами, їх можна знайти як рішення оптимізаційної задачі при обов'язковому врахуванні досить суперечливих вимог. По-перше, значення цих параметрів ТЕД і механічної трансмісії повинні відповідати заданій потужності електротрактора і розташуванню його конструктивних елементів. З іншого боку, необхідно враховувати методи керування тяговим двигуном, які забезпечують високу енергетичну віддачу електроприводу в заданому робочому діапазоні кутової швидкості та навантаження.

### 3.2.1 Вибір приводного двигуна за типом струму

Для практичної реалізації характеристики  $M(\omega)$  для електроприводу електротрактора можуть використовуватися як двигуни змінного струму, так і двигуни постійного струму з керованими клапанними перетворювачами.

Однак використання послідовного збудження DPS має ряд переваг:

- 1) Механічні властивості послідовного збудження ДПС  $M(\omega)$ , природного і штучного в кожному регулюванні швидкості, близькі до гіперболи, тобто якщо момент опору навантаження змінюється, кутова

швидкість  $\omega$  змінюється автоматично і забезпечує потужність  $P_1 = \text{const}$ , що відповідає закон ТЕД- Перевірте рис. 3.3). У цьому випадку для управління ДАІ може використовуватися напівпровідниковий керований випрямляч невеликих розмірів і невисокої вартості, коли він живиться від центральної мережі змінного струму. Для реалізації такого ж закону керування на асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором необхідно використовувати трифазний перетворювач частоти, що відповідає вартості двигуна [55].

2) На відміну від асинхронних, двигуни постійного струму пропонують регулювання швидкості в широкому діапазоні простими технічними засобами, як від номінального, так і від номінального значення. Коефіцієнт зміни максимальної швидкості характеризує керуючі властивості двигуна  $k_{\omega} = \omega_{\text{max}} / \omega_n = 2 \dots 4$ . Для досягнення швидкості вище номінальної з асинхронними двигунами необхідно збільшити напругу живлення на 2 ... 2,5 рази. Для збільшення номінальної швидкості, що викликає сильний нагрів двигуна і перетворювача, значне збільшення втрат і зниження ККД [55].

Також ДАІ має перевагу перед асинхронними двигунами з короткозамкненими роторами за пусковими властивостями та переважувальною здатністю. Про це свідчать порівняльні дані:

		АД	ДПС
- кратність пускового струму	$K_i = I_{\text{п}} / I_n$	5 ... 7	2 ... 3
- кратність пускового моменту	$\mu_n = M_n / M_n$	1,2 ... 1,5	2 ... 3
- переважувальна здатність	$\mu_{\text{max}} = M_{\text{max}} / M_n$	2,0 ... 2,5	2 ... 3

Якщо крутний момент навантаження змінюється в широкому діапазоні, потужність  $P_2$  і струм  $I_a$  в двигуні послідовного збудника змінюються пропорційно  $\sqrt{M}$ . Це означає, що в той же момент навантаження вал ДПС послідовного збудження може мати меншу встановлену потужність порівняно з іншими електродвигунами. [55]

3) У ДПС послідовного збудження електромагнітним моментом є квадрат струму якоря  $I_a$  і, таким чином, струму навантаження  $I$ , залежний

$$M \sim I_a^2; M \sim I^2, \text{ тобто } M \sim I_a^2; I \sim \sqrt{M}.$$

З цієї причини ці двигуни використовуються в системних приводах, де потрібні високі опускові моменти і можуть спостерігатися часті перевантаження крутного моменту. Кутова швидкість двигуна відповідає

механічним параметрам (рис. 3.3)  $\omega \sim 1/\sqrt{M}$ , що призводить до корисної

продуктивності 
$$P_2 = M\omega = C\sqrt{M}.$$

Крім переваг тягових двигунів постійного струму, є і суттєві недоліки: відносно великі розміри і маса, а також наявність щіткового колекторного вузла.

### 3.2.2 Розрахунок послуг та підбір тягового ДАІ

Загальноприйнятий метод визначення розрахункових характеристик приводного двигуна за діаграмами навантаження  $P(t)$  і  $M(t)$  робочих машин не є прийнятним для вибору електротрактора ТЕД, оскільки діаграми навантаження електротракторів з ТЕД не використовуються широко. Тому запропонована методика розрахунку потужності та вибору приводного двигуна електротрактора заснована на використанні значень тягових сил  $F$ , необхідних для здійснення основних технологічних процесів трактора.

Продуктивність ТЕД визначається умовою забезпечення необхідного тягового зусилля електротрактора при виконанні найбільш енергоємного технологічного процесу – оранки ґрунту. З

$$F = K \cdot a \cdot b, \tag{3.18}$$

де  $a, b$  – відповідно глибина оранки і ширина плуга, м;  
 $K$  – питомий опір ґрунту, кПа.

За даними системних досліджень, представлених у [64], виділено три категорії ґрунтів: важкі (FB), середні (Fc) і легкі (F1), питомі опори кожного з яких  $K_v = 90$  кПа,  $K_s = 60$  кПа;  $C = 30$  кПа.

У приватних присадибних ділянках і закритих ґрунтових спорудах застосовують переважно плуги ПЛ-20 і ПК-1-18 з властивостями плужних корпусів  $v/a = 1,2 \dots 1,5$ . Оранку ґрунту проводять на глибину  $i = 10, 15, 18$  і 20 см. Як правило, використовують плуги з шириною захвату  $v = 18$  см, приймаючи потім глибину підриву шару  $i = 20$  див., для (3.18) за характером ґрунту:  $F_B = 2,43$  кН;  $F_c = 1,62$  кН;  $F_1 = 0,81$  кН.

Для перетворення тягової сили необхідно, щоб при оранці ґрунту зчіпна маса  $G = tg$  трактора з масою  $t$  мала певне значення в залежності від характеру ґрунту.

Одночасно [64]

$$G = F \cdot (\lambda \cdot \varphi_c - \xi \cdot f), \quad (3.19)$$

Де  $\lambda$  - коефіцієнт навантаження коліс блоку двигунів;

$c$  - коефіцієнт зчеплення коліс з ґрунтом;

$\xi$  - коефіцієнт, що враховує внутрішні втрати в працюючій системі;

$\varphi_c$  - Коефіцієнт опору при прокануванні коліс.

Для тракторів з шинами  $\lambda = 1$ ;  $\varphi_c = 0,5 \dots 0,7$ ;  $\xi = 1$ ;  $c = 0,1 \dots 0,12$  і вага зчеплення  $G_v = 4,05$  кН;  $G_c = 2,7$  кН і  $G_t = 1,35$  кН. Для тракторів з металевими колесами з шипами

$$G_B = 2,7 \text{ кН}; G_c = 1,8 \text{ кН} \text{ і } G_t = 0,9 \text{ кН}, \quad (3.20)$$

тобто при використанні металевих коліс потрібна менша буксирувальна маса трактора  $G$ .

Чиста потужність приводного двигуна електричного буксира визначається рівнянням [64]

$$P = \frac{(F + fG)V}{\eta_p \cdot \eta_b \cdot \eta_k}, \quad (3.21)$$

де  $F$  – сила розтягування, яка використовується при розрахунку потужності як функція властивостей ґрунту, кН;

$G$  – Вага зчеплення, кН;

$V$  – швидкість руху трактора при оранці ґрунту, м/с;

$\eta_p$  – ефективність передачі;

$\eta_b = 0,93$  – коефіцієнт, що враховує втрати від ковзання;

$\eta_k = 0,95$  – коефіцієнт, що враховує втрати на подолання кочення коліс

розмір  $\eta_T = \eta_p \cdot \eta_b \cdot \eta_k$  отримав назву тягової ефективності

електротрактора. Приймається в попередніх розрахунках  $\eta_T = 0,74 \dots 0,76$ . Для

більш точного розрахунку потужності за рівнянням (3.21) необхідно

визначити тяговий ККД з урахуванням фактичної конструкції механічної трансмісії трактора типу трансмісії, можливості використання додаткової

ланцюгової передачі. і так далі. Швидкість трактора  $V$  при введенні в рівняння

(3.21) приймається відповідно до відповідного діапазону швидкостей,

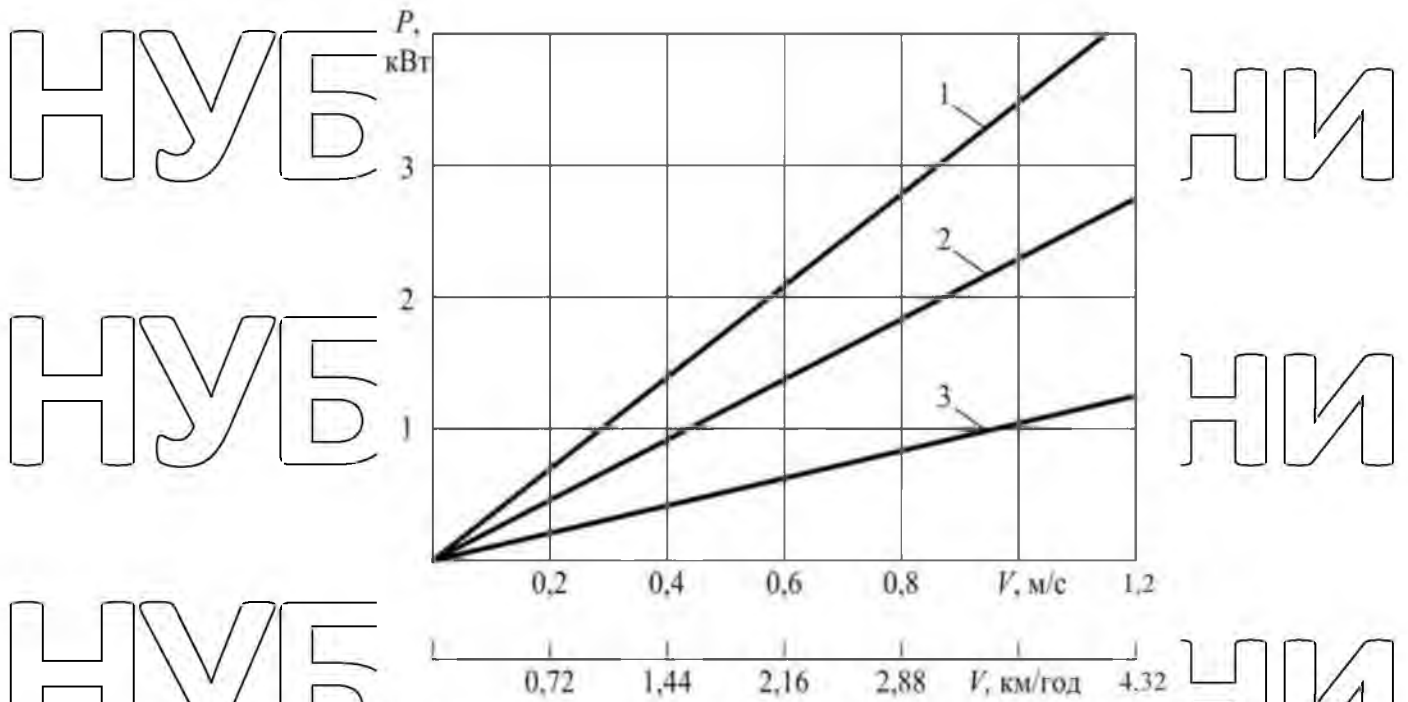
встановленого на основі досліджень і спостережень за роботою рухомих агрегатів, керованих водіями та жінками:  $V \in \{0,3; 0,6; 0,9; 1,2\}$  м/с або  $V \in \{1,08; 2,16; 3,24; 4,32\}$  км/год. [64]. На рис.3. 6 наведено діаграми сумарної

потужності  $P(V)$  при  $K = \text{const}$  тягових двигунів електробуксирів за

результатами розрахунків за рівнянням (3.21) при  $ct = 0,75$  для легких, середніх і важких ґрунтів.

НУБІП України





Боягузливий. 3.6. Схеми роботи приводного електродвигуна

електротрактора при оранці ґрунтів: 1 - важкий, 2 - середній, 3 - легкий

Графи потужності (рис.3.6) можуть бути використані на практиці для визначення номінальної потужності тягових двигунів у приводі тракторів для обробітку ґрунту з різними характеристичними кривими для питомого опору  $K$ .

Далі за значенням розрахункової потужності  $P$  за довідником або каталогом електрообладнання [45] вибирають електродвигун з наступною номінальною потужністю  $P_n$  і, по можливості, найбільшою номінальною швидкістю  $n_n$ , що має найбільший ККД і найменших розмірів, але з обов'язковими умовами Кратність максимальної швидкості  $K_{\omega} = \omega_{max} / \omega_n = v_{max} / v_n = 2,0 \dots 2,25$ ,  $v_{max}$  також вказана в каталогах. Крім того, двигун підбирається за ступенем захисту не нижче IP44, кліматичними характеристиками та категорією розташування U2. Крім ККД, важливим параметром при виборі двигуна є якість машини, що визначається відносною вагою двигуна, кг/кВт.

# НУБІП України

$$q = G_d \cdot P_n, \quad (3.22)$$

де  $G_d$  — маса електродвигуна, кг.

## 3.2.3 Вибір передавального числа

Переміщення коробки передач в приводі блоку двигуна можна визначити за перекладом (3.2) для максимальних значень кутової швидкості електродвигуна  $\omega_{\max}$  і швидкості агрегату  $V_{\text{tah}}$  бути визначеним

$$i_p = \frac{\omega_{\max} \cdot R_k}{V_{\max}}, \quad (3.23)$$

У системних випробуваннях металевих і гумових коліс блоків двигунів з двигуном внутрішнього згоряння та ТЕД [77] обгрунтовано раціональні конструкції ведучих коліс з оптимальним діаметром  $D_k = 520$  мм.

Максимальна швидкість серійного ДПС загальнопромислового призначення становить  $n_{\max} = 4000$  об/хв, тобто  $\omega_{\max} = 418,7$  рад/с. У [77] також уточнювався робочий діапазон частоти обертання блоків двигунів під час оранки (2.51). Припустивши для розрахунку  $i_p$ ,  $V_{\text{tah}} = 1,2$  м/с, отримаємо

$$i_p = \frac{418,7 \cdot 0,26}{1,2} = 90,7.$$

Коробки передач з передавальним числом такої величини мають великі розміри і вагу, що обмежує їх використання в блоках двигунів. Тому механічну передачу в електродвигунах з передачею слід виконувати з

передачею  $i_p \leq 40$  ланцюговою передачею з  $i_l = 2 \dots 3$ . У цьому випадку визначається переклад механічної трансмісії

$$i_{\text{МП}} = i_p \cdot i_l. \quad (2,55)$$

Зауважимо, що використання його на додаток до ланцюгової передачі значно спрощує конструкцію механічної трансмісії блоку електродвигуна.

## 3.2.4 Перевірка приводного двигуна електропривода трактора

Перевірка електродвигуна приводу в умовах запуску. Для безпечного запуску приводного двигуна блоку електродвигуна необхідно, щоб величина пускового моменту двигуна МП була достатньою для подолання початкового статичного моменту руху блоку електродвигуна і спрацьовування робочого тіла.

Перевірка TED в умовах запуску відбувається за умови [126]

$$M_{II} = M_{max} = M_H \cdot K_M \cdot K_U^2 \geq 1,25 \frac{M_{Зр.}}{i_{МП} \cdot \eta_{МП}}, \quad (2,56)$$

де  $K_M$  - кратність максимального крутного моменту двигуна;

$K_U = U_I / U_H$  - коефіцієнт, що враховує падіння напруги;

1,25 - коефіцієнт, що враховує велику кількість надлишку крутного моменту, необхідного для розгону маховика приводу,

$M_{Зр.}$  - статичний момент зміщення блоку двигуна з робочим органом. Для блоку двигуна із заглибленим плугом прийнято  $M_{Зр} = 1,5 \dots 2,0$  Мн.

При використанні в якості моторного блоку TED виконується послідовне збудження ДПС, при якому  $M_p = M_{тап}$ , умова (2.56).

Тестування TED в умовах перевантаження. Перевантажувальна здатність блоку двигуна TED перевіряється за умовою [126]

$$M_{max} = M_{II} \cdot K_M \cdot K_U^2 \geq (1,2 \dots 1,3) M_{Cmax}, \quad (2,57)$$

де  $M_{Cmax}$  - максимальне значення статичного моменту опору ґрунту;

1,2 ... 1,3 - коефіцієнт, що враховує дисперсію моменту опору при оранці ґрунту.

Тест TED в умовах нагрівання. Втрати енергії в елементах електроприводу пов'язані з відведенням тепла і його нагріванням.

Практично всі елементи силового каналу електроприводу блоку двигунів (рис. 2.4) є критичними для температурного режиму. Тепло, що виділяється в TED, підвищує температуру ізоляції, а отже, інтенсивність її старіння. У загальному випадку, коли вид тепловіддачі в двигуні викликає нагрівання ізоляції і термін її служби менше зазначеного, такий режим роботи

НУБІП УКРАЇНИ

допустимий в умовах нагріву. В даному випадку це втрати тепла  $\Delta P_T$  постійна і після перехідного періоду нагріву елементів каналу встановлюється постійна температура  $\theta$  дорівнює

НУБІП УКРАЇНИ

$$\theta_s = \theta_{н.с.} + \tau, \quad (2,58)$$

Де  $\theta_{н.с.}$  - температура навколишнього середовища;  
 $\tau$  - температура розглянутого елемента перевищує температуру

навколишнього середовища.

НУБІП УКРАЇНИ

Значення  $\tau$  пропорційне втраті потужності  $\Delta P_T$  і обернено пропорційна тепловіддачі  $A$ , Вт/0с

$$\tau = \Delta P_T / A. \quad (2,59)$$

НУБІП УКРАЇНИ

на  $\theta = const$  співвідношення між робочою температурою і швидкістю зносу ізоляції характеризується діаграмами терміну служби ізоляції  $T(\theta)$ , показаний на рис. 2.7. Зручно вводити і використовувати характеристику швидкості зносу ізоляції при певній температурі в подальшому  $d(\theta) = T(\theta)$ .

НУБІП УКРАЇНИ

Характер цієї залежності (рис. 2.8) для ізоляції класів В і Г показує, що швидкість старіння ізоляції залежить від робочої температури. При класі ізоляції А, якщо температура підвищиться на 8 ... 100 °С вище номінального значення, швидкість старіння ізоляції подвоюється

$$d(\theta + 10^\circ C) \cong 2d(\theta_n). \quad (2,60)$$

НУБІП УКРАЇНИ

Для статичного температурного режиму рівняння (2.58) має вигляд з урахуванням (2.59)

$$\theta = \theta_{о.с.} + \tau = \theta_{о.с.} + \Delta P_T / A = const. \quad (2,61)$$

НУБІП УКРАЇНИ

Режим роботи при  $\Delta P_T = \text{var}$  характерний для електроприводу блоку двигуна, тому не більше номінального для оцінки умов нагріву ізоляції та швидкості її старіння при  $\Theta(t) = \text{var}$ , тобто  $d[\theta(t)] \leq d_n$ .

Умову допустимості типу розподілу втрат за критерієм терміну служби ізоляції можна представити у вигляді наближеної нерівності [123]

$$d_n \geq d_{cp} = d \left( \theta_{o.c.} + \frac{\Delta P_{cp}}{A} \right) \quad (2,62)$$

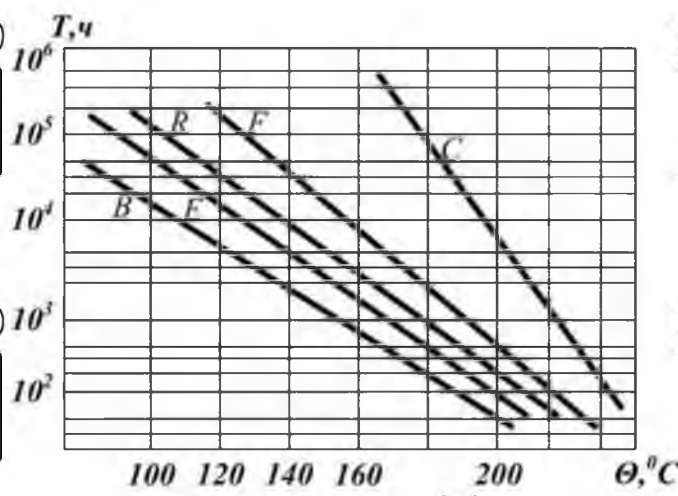


Рисунок 2.7 – Залежності терміну служби різних класів ізоляції від робочої температури

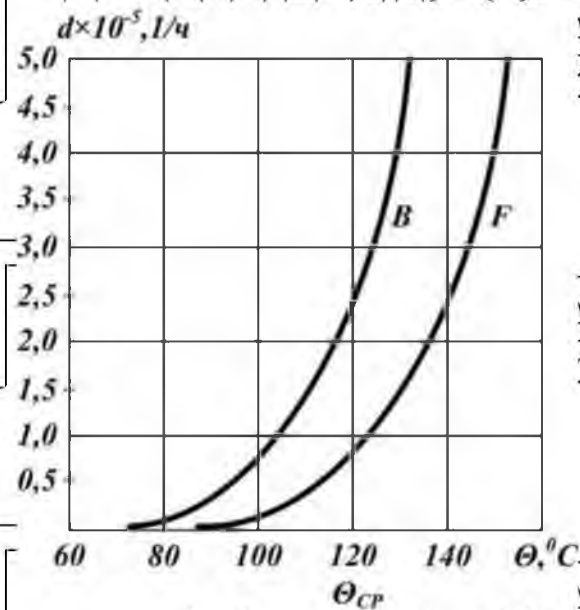


Рисунок 2.8 Залежність швидкості старіння ізоляції від температури  $1/T$

Якщо (2.62) врахувати у вигляді рівності, то це умова повного навантаження двигуна в умовах нагріву. Крім того, співвідношення (2.62) означає, що режим розподілу втрат, для якого виконується рівняння, відповідає номінальному режиму, для якого розраховується ТЕД за критерієм його терміну служби.

Співвідношення (2.62) є основою для оцінки можливих ситуацій у зв'язку з обмеженнями режимів перетворення енергії. Ці обмеження враховуються при виборі ТЕД і його випробуванні в умовах нагрівання, а також при випробуванні еквівалентності з точки зору впливу на термін служби ізоляції двох режимів з різними типами втрат і тепловіддачі. З (2.62) випливає, що ці два режими еквівалентні, якщо для кожного з них визначені швидкості старіння ізоляції однакові.

### 3.3 Теоретичні дослідження керуючої поведінки тягового двигуна

#### Розділ 2.5

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 4.1 Визначення раціональних параметрів електричного буксира

Основною потужністю електродвигуна є загальна маса  $G$ , номінальна тяга  $F_n$  і швидкість  $V_n$ , а також максимальна тяга  $F_{\max}$  і швидкість  $V_{\max}$ . При цьому показник  $F_n$  визначає вибір номінальної потужності  $P_n$  і номінального крутного моменту  $M_n$  ТЕД і можливість його тривалої роботи в умовах нагріву. Експлуатаційні показники зазвичай визначають на початковому етапі розробки блоку двигунів за результатами аналізу встановлених технологічних циклів роботи та умов експлуатації, а також на основі узагальнених техніко-

економічних розрахунків. Оскільки досвід конструювання та експлуатації блоків двигунів з тяговими електродвигунами в даній чає досить обмежений,

При вирішенні задач оптимізації параметрів блоку електродвигуна для адекватного опису площі оптимуму ми використовуємо поліном другого порядку

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j,j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (3.1)$$

де  $y$  - цільова функція або параметр оптимізації;

$b_0; b_i; b_{ij}; b_{ii}$  - коефіцієнти полінома;

$x_i; x_j$  - незалежні змінні або фактори.

Отримано математичну модель для опису та дослідження діапазону оптимального параметра оптимізації блоку електродвигуна на основі планів другого порядку – ортогонального центрального складеного плану (ОСКР), метод якого детально описаний у [65], 66,83, 93,95,121]. Тяга блоку двигуна  $F$  приймається як функція цільового або оптимізаційного параметра і як незалежні змінні: чиста потужність приводного двигуна  $P$ , частота обертання  $V$  і загальна маса блоку двигуна  $G$ . Позначення факторів і ступінь їх варіації наведені в таблиці 3.1.

Кодування чи нормалізація факторів відбувається через співвідношення

$$x_i = \frac{X_i - X_{i,0}}{\Delta X_i} \text{ та, відповідно } x_{i,B} = +1; x_{i,H} = -1; x_{i,0} = 0. \quad (3.2)$$

Матриця планування ОСКР для трьох факторів ( $n = 3$ ) наведена в таблиці

3.2 (стовпці 2, 3 і 4).

Загальна оцінка плану у факторному просторі дорівнює

$$N = N_f + N_\alpha + N_\theta,$$

де  $N_f$  - кількість експериментів повного факторного експерименту;

$N_\alpha$  - кількість дослідів у нейтральних точках  $N_\alpha = 6$ ;

$N_\theta$  - кількість дослідів у центрі плану.

Таблиця 3.1

## Фактори варіації та їх рівень

Фактори	$P$ , кВт	$B$ , Місц	$AT$ , кН
Позначення факторів	$X1$	$X2$	$X3$
Рівні варіації:			
вище, X, B	3.0	1.2	2.7
нижче, Xi, N	0.6	0.4	0.9
Нуль, xi, 0	1.8	0.8	1.2
Інтервал варіації, LNi	1.2	0.4	0.9

Для ОССР другого порядку критерієм оптимізації є ортогональність усіх векторних стовпців матриці плану, яка забезпечується двома способами:

1) Перетворення квадратичних доданків  $x_{2i}^2$ ,  $g$  (стовпці 9а, 10а, 11а) у нові, штучні  $x_{2i}$  (стовпці 9, 10 і 11) за формулою

$$x_{i,g}^2 = x_{i,g}^2 - \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N x_{i,g}^2, \quad (3.3)$$

де  $i$  - номер множника (1,2, ..., n),

$g$  - Номер рядка матриці плану (1,2, ..., N).

2) вибір певного значення плеча зірки  $\alpha$ . Якщо кількість факторів  $n = 3$ , розмір плеча вважається  $\alpha = +1,215$ .

Для ортогонального центрального композиційного плану коефіцієнти рівняння регресії визначаються за формулою

$$b_i = \frac{1}{\sum_{g=1}^N x_{i,g}} \sum_{g=1}^N x_{i,g} \cdot y_g, \quad (3.4)$$

де  $k$  - номер останнього стовпця в матриці ОЦКП,

$y$  - значення цільової функції за порядковими розрахунками вихідної математичної моделі.

Матриця ОССР для трьох факторів

Таблиця 3.2



№ колонок	1	2	3	4-й	5	Б.	7-е	8-й	9а	10 А	11а	9	10	11	12-е	13-е	
групи Окуляри	Г	x0	x1	x2	x3	x1 x2	x1 x3	x2 x3	x1 x2 x3	x12	x22	x32	x1 ~ 2	x2 ~ 2	X3 ~ 2	Так	Так
Nf	1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+i	-1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	1,85	1.86
	2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	6.35	6.28
	3	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	1.1	1.14
	4-й	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	2.6	2.6
	5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	3.29	3.29
	6-й	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	7,79	7.68
	7-е	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	2.54	2.57
	8-й	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	4.04	4.03
Н/Д	9	+1	-1215. найчас тіше	0	0	0	0	0	0	+1476. айчас ше	0	0	+0,7459	-0,7301	-0,7301	2.13	2.1
	10	+1	+1215	0	0	0	0	0	0	+1476. айчас ше	0	0	+0,7459	-0,7301	-0,7301	4,85	4.9
	11	+1	0	-1215. найчас тіше	0	0	0	0	0	0	+1476. айчас ше	0	-0,7301	+0,7459	-0,7301	4.22	4.26
	12- е	+1	0	+1215	0	0	0	0	0	0	+1476. айчас ше	0	-0,7301	+0,7459	-0,7301	2.36	2.29
	13- е	+1	0	0	+1215	0	0	0	0	0	+1476. айчас е	-0,7301	-0,7301	+0,7459	2.56	2.48	
	14- й	+1	0	0	-1215. найча стіше	0	0	0	0	0	+1476. айчас е	-0,7301	-0,7301	+0,7459	4.3	4.19	
NO	п'ят над пят ь	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,7301	-0,7301	-0,7301	3.13	3.1	

ОСКР дозволяє отримати математичну модель параметра оптимізації для перетворених і неперетворених квадратичних членів

$$\hat{y}_g = \tilde{b}_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i, g \\ i \neq j}}^n b_{i, j} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2,$$

(3.5)

де  $\tilde{b}_0$  - перетворений нульовий член рівняння.

$$\hat{y} = \tilde{b}_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}}^n b_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (3.6)$$

$$b_0 = \tilde{b}_0 - \sum_{i=1}^n b_{i,i} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{g=1}^N x_{i,g}^2. \quad (3.7)$$

Особливість застосування в даній роботі методу експериментального планування полягає в тому, що використовується математична модель з набором розрахункових формул, що визначають функціональну залежність параметра оптимізації від факторів і властивостей досліджуваного об'єкта. Тому використовується математичний експеримент, що визначає розрахунковий набір для визначення цільової функції (табл. 3.1) за значеннями факторів матриці планування за такими рівняннями

$$F = \frac{P \cdot \eta_{\Sigma}}{V} + \psi \cdot G, \quad (3.8)$$

Де  $\eta_{\Sigma}$  - Загальний ККД електроприводу блоку двигуна;

$\psi$  - загальний коефіцієнт опору коліс.

Таким чином, для даного класу блоків двигуна значення становить  $\eta_{\Sigma}$  і  $\psi$  знаходяться в:  $\eta_{\Sigma} = 0,7 \dots 0,8$  і  $\psi = 0,65 \dots 0,85$ . Тому що в математичному

експерименті відсутня дисперсія відтворюваності цільової функції  $S_B^2\{y\}$ , необхідні для статистичної оцінки отриманих даних, значення  $\hat{S}_B^2\{y\}$  вводиться штучно в такому розмірі, щоб забезпечити необхідну точність розрахунків

$$S_B^2\{y\} = (3\sigma)^2 = (3 \cdot 0,02)^2, \quad (5.9)$$

Де  $\sigma = 0,02$  - середньоквадратична помилка (2%) або стандартна.

Відповідно до (3.4) отримуємо наступні значення коефіцієнтів рівнянь (3.5) і (3.6)

$$\begin{aligned}\tilde{b}_0 &= 3,54; b_1 = 1,4; b_2 = -1,03; b_3 = 0,72; \\ b_{12} &= -0,75; b_{13} \cong 0; b_{23} \cong 0; b_{123} = -0,0025; \\ b_{11} &= 26; b_{22} = 12; b_{33} = 22.\end{aligned}$$

Оцінка значущості коефіцієнтів рівнянь регресії дається за критерієм Стьюдента за умови

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_B\{y\}} > t_T = 2,131, \quad (3.10)$$

Де  $t_{ip}, t_T$  - розрахункове та табличне значення критерію;

$|b_i|$  - абсолютне значення і-го коефіцієнта;

Помилка розрахунку  $y_1$ , те саме  $\sqrt{S_B^2}$  визначається рівнянням (3.9) і є однаковим  $S_B\{y\} = 0,06$ .

Коефіцієнти  $b_{13}, b_{23}, b_{123}$  і, таким чином, рівняння регресії (3.6) не були

значущими, коли враховувався перерахунок вільного коефіцієнта  $\tilde{b}_0$  відповідно до рівняння (3.7) в остаточному варіанті вигляду

$$\hat{y} = 3,1 + 1,4x_1 - 1,03x_2 + 0,72x_3 - 0,75x_1x_2 + 0,26x_1^2 + 0,12x_2^2 + 0,22x_3^2. \quad (5.11)$$

Використовуємо рівняння (3.11) для визначення розрахункових значень цільової функції  $\hat{y}$  для кожного рядка матриці планування (таблиця 3.2) з урахуванням стовпців 2, 3, 4, 5, 9а, 10а і 11а. Розрахункові дані наведені в графі 13.

Доречність отриманого рівняння регресії (3.11) виводиться з умови за допомогою F-критерію Фішера

$$F_p = \frac{S_{ad}^2 \{y\}}{S_B^2 \{y\}} < F_T, \quad (3.12)$$

Де  $F_p, F_T$  - Розрахункове та табличне значення критерію Фішера;

$S_B^2 \{y\}$  - дисперсія відтворюваності визначається рівнянням (3.9).

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-d} \sum_{g=1}^N (y_g - \hat{y}_g)^2, \quad (3.13)$$

де  $d$  - кількість значущих коефіцієнтів рівняння (5.11) з урахуванням  $b_0$  і відповідно  $N-d=7$ ;

$T$  - Кількість паралельних експериментів. Прийнято в математичному експерименті  $t=1$ .

Значення  $y_g$  і  $\hat{y}_g$  визначаються для кожного рядка в графах 12 і 13 таблиці 3.2.

За результатами розрахунку  $S_{ad}^2 = 0,0093$  враховуючи (3.9)

$S_B^2 \{y\} = 0,0036$  а табличне значення  $F_T = 2,64$  умови (3.12) можна записати як

$$F_p = \frac{0,0093}{0,0036} = 2,58 < F_T = 2,64, \quad (5.14)$$

і рівняння регресії (5.11) є адекватним.

4.2.

4.2. Аналіз результатів визначення раціональних параметрів електротрактора

3.4.1. Методи визначення твердості ґрунту

3.4.1. Методи визначення твердості ґрунту

Твердість ґрунту характеризує його здатність протистояти проникненню будь-яких деформуючих елементів і впливає на найважливіші показники якості [17]. У рамках досліджень твердість ґрунту визначали за стандартними методами [28,34,82] за допомогою твердоміра ґрунту Wile, принцип роботи якого заснований на введенні в ґрунт металевого наконечника різного діаметру (1,27 мм для твердих ґрунтів і 1,91 мм для легких) [17]. Твердомір встановлювався наконечником донизу строго перпендикулярно поверхні підлоги. Зонд твердоміра повільно вставляли в землю, натискаючи обидві ручки з однаковою силою.

Вимірювання проводили, коли зонд п'ять разів проникав у землю на 20 см. Точки вимірювання були на прямій, відстань між ними становила один метр. Дані експериментальних вимірювань вносили в протокол спостереження та проводили їх статистичну обробку за методикою [34].

#### 3.4.2 Методи визначення вологості ґрунту

Вологість обробленого ґрунту істотно впливає на технологічний процес. Вологість ґрунту визначали звичайними методами [46,49,106]. Садром яких є визначення втрат вологи під час висихання ґрунту. Відбір проб, пакування та транспортування зразків, а також відбір вимірювального обладнання здійснювали відповідно до специфікацій [124,125].

Для визначення вологості ґрунту використовувалися сертифіковані прилади: алюмінієві ящики, сівалки, термopара MO-112, електронні ваги ВГЕ-15-ТЗ-ДВ та вологомір ґрунту Rapitest 1825. Для визначення використовувався метод гарячої сушки. вологість ґрунту. Зразки ґрунту поміщали в висушені пронумеровані алюмінієві ящики і витримували в сушильній шафі при температурі 110 °С протягом 5 годин. Перед сушінням їх зважували на електронних вагах. Після висихання зразки ґрунту знову

зважували і на основі отриманих результатів розраховували вологість за формулою

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

де  $m_1$  - маса вологого зразка ґрунту, кг;

$m_2$  - маса сухої проби ґрунту, кг.

Під час дослідів вологість ґрунту становила 20-22%. Отримані дані вносили в протокол спостереження.

### 3.4.3 Методи енергетичної оцінки блоку електродвигуна

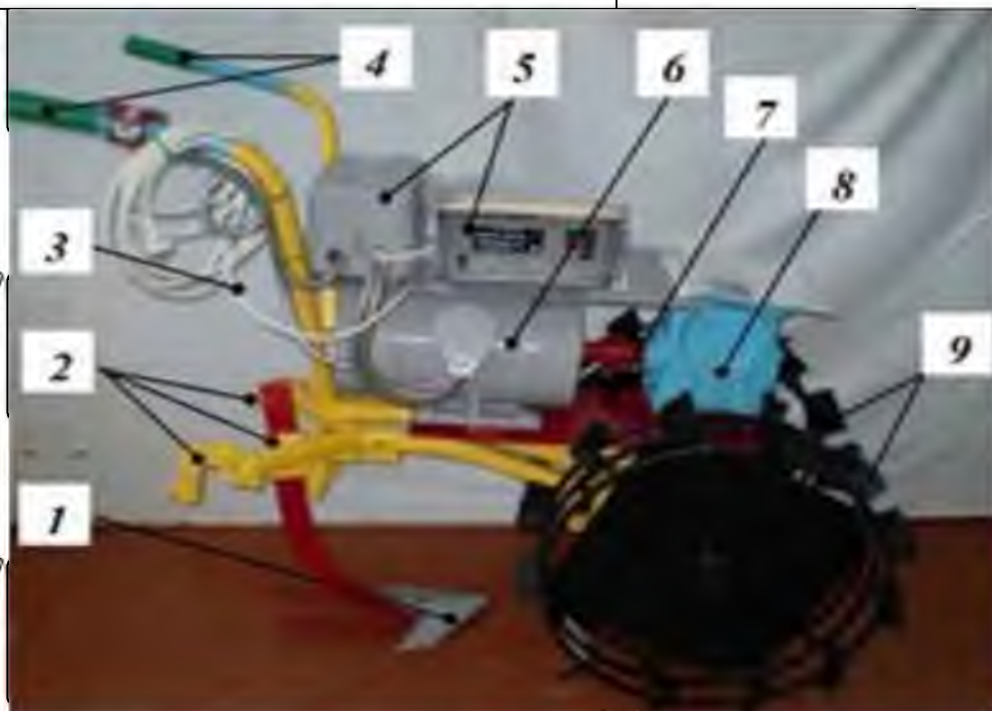
У лабораторії імені проф. Державного агротехнологічного університету імені Овчарова імені Дмитра Моторного пропонується центральне електропостачання від однофазної мережі змінного струму за допомогою гнучкого кабелю та керованого клапанного перетворювача.

Таблиця 3.3

**Технічні характеристики блоку електродвигуна**

Гяговий двигун	D-12
Потужність кВт	2.5
Номінальна напруга живлення, В.	220
Номінальний струм, А	п'ятнадцять
Швидкість, об/хв	1175
Механічна трансмісія	Черв'ячні та ланцюгові передачі
Продуктивність при оранці ґрунту, га/год.	0,25
Покриття, див	18... 50
Глибина оранки, см.	до 20
Робоча швидкість, км/год.	1,0 ... 7,0
Кількість передач: вперед/назад	5/2

Габаритні розміри, мм:	
довжина	1250
широкий	550
висота	940
Вага (кг)	100



1 - робочий орган; 2 - кліпси для кріплення робочих органів; 3 - гнучкий трос; 4 - важелі (ручки) управління; 5 - система контролю і захисту; 6 - тяговий двигун; 7 - корпус (рама) 8 - редуктор; 9 - колеса

Рисунок 3.3 - Загальний вигляд прототипу електродвигунського блоку

Енергетичними показниками обробітку ґрунту електроблоком є потужність, необхідна для основного обробітку ґрунту, а літома витрата енергії залежить від ширини плужного агрегату, площі або одиниці обробленого ґрунту. У цьому випадку існує літома енергоємність обробітку на одиницю об'єму обробленого ґрунту для енергетичної оцінки електродвигуна під час оранки [34,87]. Цей показник найкраще враховує особливості обробітку ґрунту тяговими робочими органами під час оранки. Дослідження енергетичної ефективності електродвигунового агрегату

проводилися за [132] і полягали у визначенні необхідної потужності для оранки та питомої витрати енергії (епіт, кВт/год/м<sup>3</sup>) при оранці ґрунту.

Під час експериментальних випробувань контролювали такі значення: напруга і струм в обмотці якоря тягового двигуна постійного струму, швидкість і потужність ТЕД, електрична енергія, споживана мережею. Для дослідження використовувалися електровимірювальні прилади: Вольтметр ВЛМ 2 / 300У; Амперметр SD-303В; Набір вимірювальний К-505; Тахометр цифровий безконтактний VEMETESN GM8905; лічильник однофазний NIC 2102-02.

#### 4.2 Аналіз результатів визначення раціональних параметрів блоку електродвигуна

Рівняння регресії (3.11) з урахуванням даних таблиці 3.2 та зв'язків між факторами у фізичних та кодованих одиницях

$$P = x_1 \cdot 1,2 + 1,8 [\text{кВт}]; V = x_2 \cdot 0,4 + 0,8 [\text{м/с}]; G = x_3 \cdot 0,9 + 1,2 [\text{кН}] \quad (4.1)$$

можуть бути представлені коефіцієнтами  $P$ ,  $V$  і  $G$  у фізичних одиницях

$$F = 1,531 + 1,517P - 0,965V - 0,145G - 1,56PV + 0,25P^2 + 0,75V^2 + 0,27G^2. \quad (4.2)$$

Отримано адекватне рівняння параметра оптимізації блоку електродвигуна в заданому вигляді, що ускладнює дослідження оптимальної площі, тому її необхідно представити в типовому канонічному вигляді.

Перехід до канонічної форми здійснюється шляхом переміщення початку координат факторного простору в точку в середині поверхні відгуку та повороту осей на певний кут у факторному просторі. При цьому паралельне перенесення початку координат до центру усуває лінійні доданки і змінює значення вільного члена в вихідному рівнянні, а обертання осей відкидає взаємодію факторів.

У результаті канонічного перетворення рівняння (3.11) має вигляд



$$Y - Y_s = B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2, \quad (4.3)$$

де  $Y_s$  – значення параметра оптимізації;

Так значення параметра оптимізації в середині області відгуку, тобто в новому початку координат;

$X_1, X_2, X_3$  – канонічні змінні, які є лінійними функціями факторів;

$B_{11}; B_{22}; B_{33}$  – коефіцієнти канонічного рівняння.

Перенесення початку координат і обертання осей відбувається за відомими правилами аналітичної геометрії [65]. Щоб визначити координати нового центру зони відгуку  $X$  для рівняння (3.11), необхідно продиференціювати для кожної змінної  $x_i$  і відокремити окремі похідні до нуля

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = 1,4 - 0,75x_2 + 0,52x_1 = 0,$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = -1,03 - 0,75x_1 + 0,24x_2 = 0;$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_3} = 0,72 + 0,44x_3 = 0. \quad (4.4)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4.4) отримуємо значення координат центру зони відгуку  $S_z$

$$x_{1s} = -0,997; \quad x_{2s} = 2,558; \quad x_{3s} = -1,636. \quad (4.5)$$

При заміні значень координат у вихідне рівняння (5.11) визначають значення параметра оптимізації:  $Y_s = 1,432$ .

Координати  $x_{1s}; x_{2s}$  і  $x_{3s}$ , а значення  $X$  відповідають наступним значенням факторів і функцій цілі в фізичних одиницях згідно (4.1)

$$P = x_{1s} \cdot 1,2 + 1,8 = 0,6 \text{ кВт};$$

$$V = x_{2s} \cdot 0,4 + 0,8 = 1,82 \text{ м/с};$$

$$G = x_{3s} \cdot 0,9 + 1,2 = 0,27 \text{ кН};$$

$$F = 1,432 \text{ кН}. \quad (4.6)$$

Для того щоб отримати аналітичну та графічну інтерпретацію оптимального діапазону параметра оптимізації, що описується рівнянням

(3.11), а також визначити продуктивність електродвигуна, близьку до оптимальної, використовуємо метод двовимірного перехресного -ділянки поверхні відгуку. Побудова двовимірних перерізів поверхні відгуку параметра оптимізації відбувається в такому порядку [66]. У рівняння регресії (3.11) незалежно від кількості факторів вводимо значення всіх факторів, близькі до оптимальних значень або дорівнюють нулю, за винятком двох. У результаті рівняння (5.11) має вигляд рівняння регресії, яке виражає залежність параметра оптимізації від двох факторів. Переведемо рівняння в канонічний вигляд.

Посилаючись на отримане рівняння регресії (3.11), розглянемо три варіанти двовимірних перерізів поверхні відгуку з побудовою та аналізом сімейства контурних кривих.

1. Візьмемо (3.11)  $x_1 = 0$ , що відповідає значенню коефіцієнта  $P = 1,8$  кВт. У цьому випадку двовимірний перетин поверхні відгуку характеризує параметр оптимізації як функцію швидкості ( $x_2$ ) і маси ( $x_3$ ) блоку двигуна. Рівняння (3.11) має вигляд

$$\hat{y} = 3,1 - 1,03x_2 + 0,72x_3 + 0,12x_2^2 + 0,22x_3^2. \quad (4.7)$$

Визначити координати центральної точки  $S_z$  як результат розв'язування системи рівнянь у частинних похідних.

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} = -1,03 + 0,24x_2 = 0;$$

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} = 0,72 + 0,44x_3 = 0;$$

$$x_{2s} = 4,292; \quad x_{3s} = -1,636. \quad (4.8)$$

Після вставки значень  $x_{2s}$  і  $x_{3s}$  в (4.7) визначте значення параметра: Оптимізація  $Y_s = 0,301$ . Проведемо канонічне перетворення рівняння (4.4), характерним визначником якого є вид. Має

$$f(B) = \begin{vmatrix} b_{11} - B & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{11} - B \end{vmatrix} = 0. \quad (4.9)$$

Розв'язок рівняння (4.11) подається у вигляді  $B^2 - a_1 B + a_2 = 0$ , де  $a_1 = (b_{11} + b_{22}) = 0,12 + 0,22 = 0,34$ ,  $a_2 = (b_{11} \cdot b_{22} - 0,25b_{12}^2) = (0,12 \cdot 0,22 - 0,23 \cdot 0^2) = 0,0264$ ,

після заміни отримуємо

$$B^2 - 0,34B + 0,264 = 0.$$

Два корені цього рівняння  $B_{11} = 0,12$  і  $B_{12} = 0,22$  визначають значення коефіцієнтів рівняння регресії в канонічному вигляді

$$Y - 0,301 = 0,12X_1^2 + 0,22X_2^2. \quad (4.10)$$

Оскільки коефіцієнти  $B_{11}$  і  $B_{22}$  мають однаковий знак, контурні криві є еліпсами. Контурні криві для значень  $Y_s = 0,301$  (центр);  $0,29$ ;  $0,27$ ;  $0,25$ ;  $0,23$ ;  $0,21$ ;  $0,19$  показано на рисунку 4.3

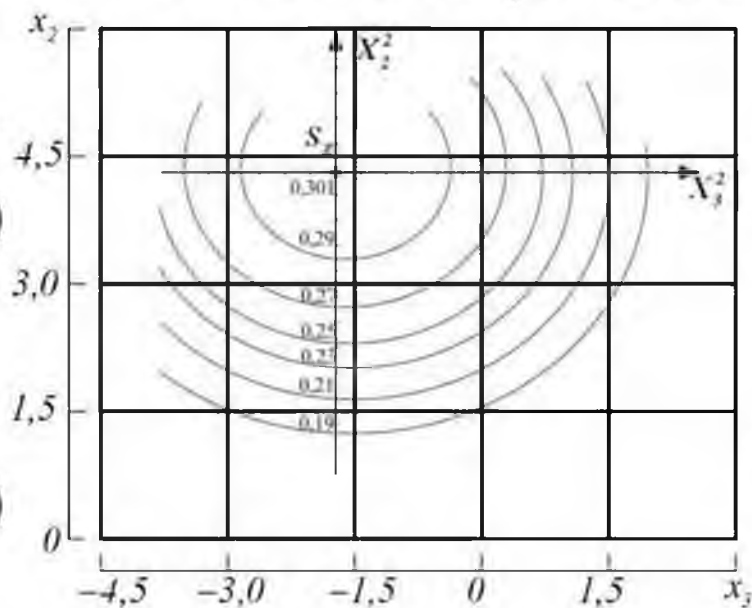


Рисунок 4.3 - Контурні криві перерізів поверхні відгуку при  $(x = 0, P = 1,8$

кВт) і значеннях  $U_s = 0,301; 0,29; 0,27; 0,25; 0,23; 0,21; 0,19$ .

Дані з рис. 4.3 показують, що максимальне значення параметра оптимізації в перерізі становить  $0,301$  кН і при швидкості  $x_{2s} = 1,636$  або

згідно (4.7) у фізичних одиницях  $V = 2,52$  м/с і  $G = 0,27$  має місце кН.

Відповідаючи оптимальному діапазону при  $U_s = 0,29$  і  $P = 1,8$  кВт, значення

розглянутих факторів близькі до оптимальних в діапазоні  $V = 2,2 \dots 3,0$  м / с і  $G = 1,3 \dots 0,83$  кН.

2. Візьмемо (3.11)  $x_2 = 0$ , що відповідає значенню коефіцієнта  $V = 0,8$  м / с. При цьому двовимірний перетин поверхні відгуку характеризує параметр оптимізації як функцію потужності ( $x_1$ ) і маси ( $x_3$ ) блоку електродвигуна. Рівняння (3.11) має вигляд

$$\hat{y} = 3,1 + 1,4x_1 + 0,73x_3 + 0,26x_1^2 + 0,22x_3^2. \quad (4.11)$$

Визначити координати центру поверхні та значення параметра оптимізації

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} &= 1,4 + 0,52x_1 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} &= 0,72 + 0,44x_3 = 0. \end{aligned} \quad (4.12)$$

В результаті системного рішення отримуємо  $x_{1s} = 2,692$ ,  $x_{3s} = 1,636$  і  $Y_s = 0,626$ . Розв'язок характеристичного визначника (4.9) для цього випадку має вигляд квадратного рівняння  $B^2 - 0,48B + 0,0572 = 0$ , корені яких дорівнюють

$B_{11} = 0,22$  і  $B_{22} = 0,28$ , а рівняння в канонічному вигляді має вигляд

$$\left( Y - 0,626 = 0,22X_1^2 + 0,28X_2^2 \right). \quad (4.13)$$

У цьому випадку контурні криві мають форму еліпса (рис. 4.4). Згідно з рис. 4.4, в перерізі зони реакції максимальне значення параметра оптимізації

дорівнює  $0,626$  кН, якщо потужність двигуна  $x_{1s} = 2,692$  і загальна маса  $x_{3s} =$

$1,636$  або у фізичних одиницях  $P = 1,43$  кВт і  $G = 0,27$  становить кН. З діапазону умовного оптимуму при  $Y_s = 0,6$  кН випливає, що значення розглянутих факторів  $P$  і  $G$  близькі до оптимуму в діапазоні  $P = 0,6 \dots 2,0$  кВт і

$G = 1,2 \dots 0,83$  кН. при  $V = 0,8$  м/с.

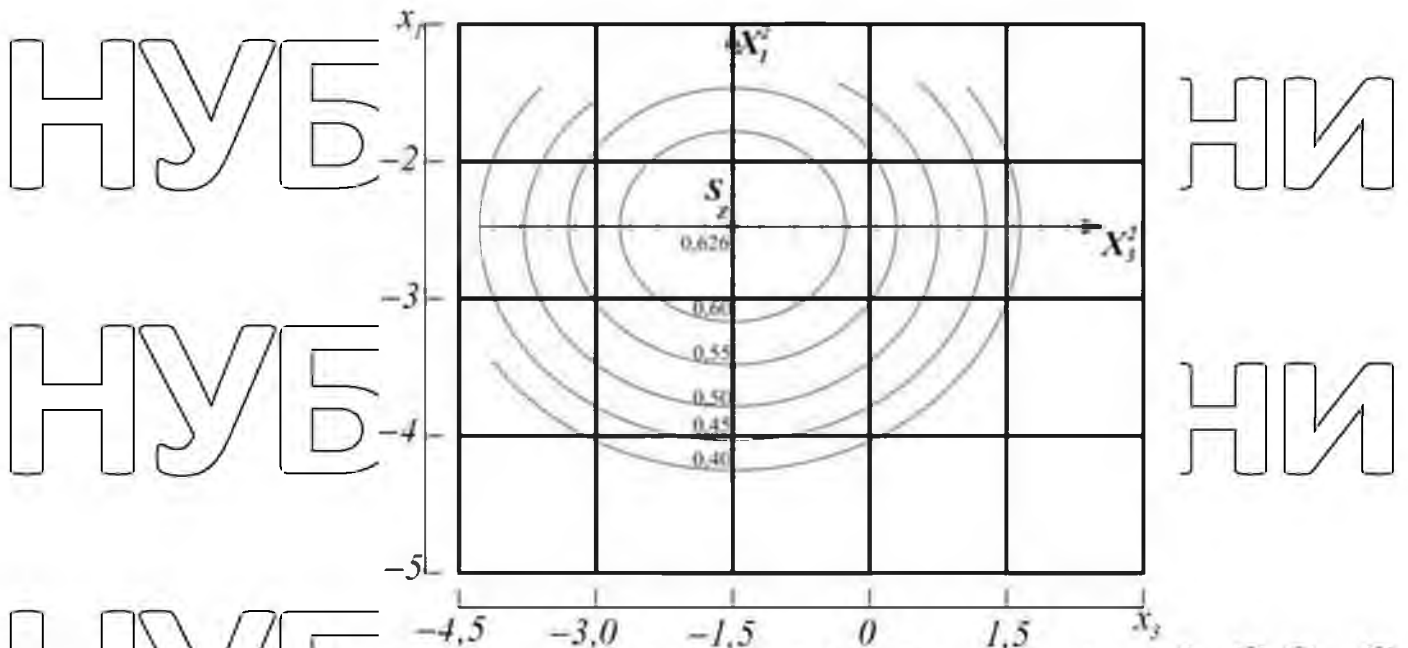


Рисунок 4.4 - Контури криві переріз зони реакції при  $x_2 = 0$  ( $V = 0,8$  м/с) і значеннях  $Y_s = 0,626$  (центр);  $0,6; 0,55; 0,5; 0,45; 0,4$ .

3. Візьмемо (3.11)  $x_3 = 0$ , що відповідає значенню коефіцієнта  $G = 1,2$  кН.

У цьому випадку двовимірний переріз поверхні відгуку характеризує параметр оптимізації як функцію потужності ( $x_1$ ) і швидкості ( $x_2$ ). При канонічному перетворенні рівняння (3.11) для цього випадку, окрім перенесення початку координат в нову точку, осі також повертаються на певний кут  $\alpha$  в факторному просторі, а це означає, що в рівнянні (3.11) немає не є подарною взаємодією факторів ( $x_1 \cdot x_2$ ). Відповідно до [65,66] кут обертання осей визначається за формулою

$$\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{b_{11} - b_{22}}{b_{12}} \quad (4.14)$$

У нашому випадку

$$\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{b_{11} - b_{22}}{b_{12}} = \frac{0,26 - 0,12}{-0,75} = -0,187,$$

відповідно до кута  $\alpha = -36^\circ 12'$ .

Нарешті, вихідне рівняння (4.11) має вигляд

$\hat{y} = 3,1 + 1,4x_1 - 1,03x_2 + 0,26x_1^2 + 0,12x_2^2$  (4.15)

Знайдіть координати центру поверхні відповіді, вивівши рівняння (4.14) і розв'язавши систему

$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = 1,4 + 0,52x_1 = 0;$   
 $\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} = -1,03 + 0,24x_2 = 0.$  (4.16)

Де

$x_{1s} = -\frac{1,4}{0,52} = -2,69; x_{2s} = -\frac{1,03}{0,24} = -4,29.$

Значення параметра оптимізації в середній області відгуку визначається шляхом вставки координат  $x_{1s}$  і  $x_{2s}$  в (4.14)

$Y_s = 3,1 + 1,4(-2,69) - 1,03 \cdot 4,29 + 0,26(-2,69)^2 + 0,12 \cdot 4,29^2 = -1,0$

Рівняння регресії (4.14) у канонічному вигляді має вигляд

$Y + 1 = 0,26X_1^2 + 0,12X_2^2.$

Оскільки коефіцієнти канонічних рівнянь B11 і B22 мають однаковий знак, то контурні криві двовимірних перерізів поверхні відгуку є еліпсами. Контурні криві перерізів зони відгуку при  $x_3 = 0$  і значеннях параметра  $Y_s = 0,9; 0,8; 0,7; 0,6$  і  $0,5$  показано на рис. 4.5.

НУБІП України

НУБІП України

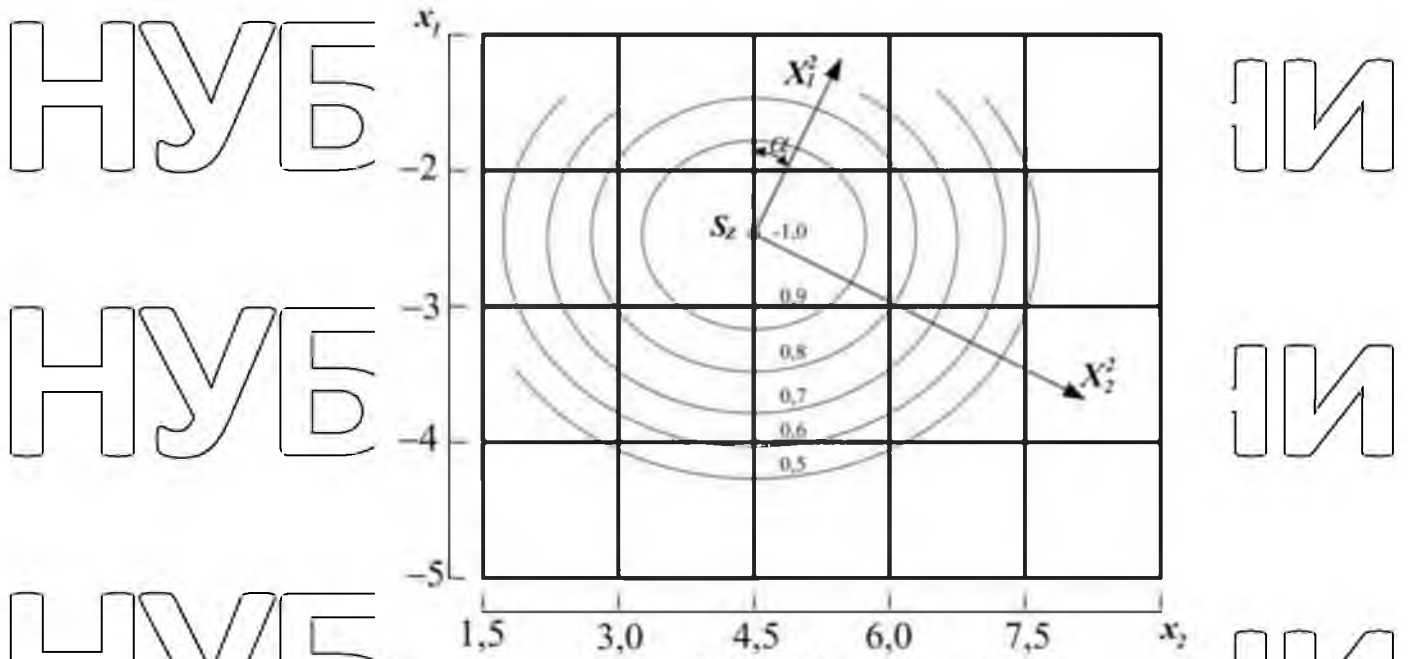


Рисунок 4.5 - Контурні криві двовимірних перерізів зони відгуку при  $x_3 = 0$  ( $G = 1,2$  кН) і значеннях  $Y_s = 0,9; 0,8; 0,7; 0,6$  і  $0,5$ .

З рис. 4.5 випливає, що в перерізі зони відгуку максимальне значення параметра оптимізації  $Y_s = -1,0$  кН зустрічається при значеннях коефіцієнтів  $x_1s = -2,69$  і  $x_2s = 4,29$  або в фізичних одиницях відповідно до рис. (5.15)

Потужність  $P = 1,43$  кВт і швидкість  $V = 2,2 \dots 3,0$  м / с при  $G = 1,2$  кН.

Отримані криві двовимірних перерізів зон відгуку (рис. 4.3-4.5) можна оцінити на основі зміни значення критерію оптимізації  $F$  як функції кодованого та натурального значень розглянути фактори. Виконання всіх можливих двовимірних перерізів поверхонь відгуку дає чітке уявлення про значення критерію оптимізації при зміні рівнів кожної пари факторів.

Підводячи підсумок, підсумовуються результати для даного класу електродвигунів, найважливіші показники продуктивності практично оптимальні з урахуванням реальних умов експлуатації агрегатів можуть бути

в межах:

$$F = 1,5 \dots 3,0 \text{ кН}; P = 1,0 \dots 3,0 \text{ кВт}; V = 0,6 \dots 1,0 \text{ м / с}; G = 0,5 \dots 1,1 \text{ кН}.$$



### 4.3 Аналіз результатів польових досліджень блоку електродвигуна

На пунктах управління ФГ «СНІСЕЙ-7» (с. Боцове Мелітопольського району Запорізької області) проведено польові випробування дослідного зразка блоку двигуна МБ-ЦЕП з тяговим двигуном постійного струму з послідовним збудженням. Раніше культурами були картопля та огірки. Роботи проводилися під час весняної оранки, рельєф ділянок рівнинний, механічні властивості ґрунту трав'янисто-піщані.

Загальний вигляд прототипу електродвигунового агрегату в агрегуванні з плугом П1-20/2 під час польових випробувань наведено на рис. 4.6.



Рисунок 4.6 - Польові випробування блоку електродвигуна

Під час польових випробувань контролювали значення напруги, струму якоря та швидкості приводного двигуна, глибини обробітку ґрунту, частоти обертання блоку двигуна та споживання електроенергії.

Польові випробування проводили з різною швидкістю заповитвача і глибини обробітку ґрунту (корита плуга). Мінімальна швидкість плуга при

роботі з плугом П1-20/2 регулювалася інструкцією з експлуатації блоку двигунів [148] і становила 2 км/год. Максимальне значення швидкості обмежено через значення твердості ґрунту та фізичних можливостей оператора.

Потоко-часові характеристики тягового двигуна при різних значеннях глибини обробки ґрунту наведені на рис. 4.7. Аналіз властивостей показує, що на глибині 10, 15 і 20 см середній струм якоря становив відповідно 5,9, 10,1 і 14,8 А, що означає значення коефіцієнта навантаження тягового двигуна від 0,37 до 0,93, тобто двигун працює на максимальному обробітку ґрунту без перевантаження.

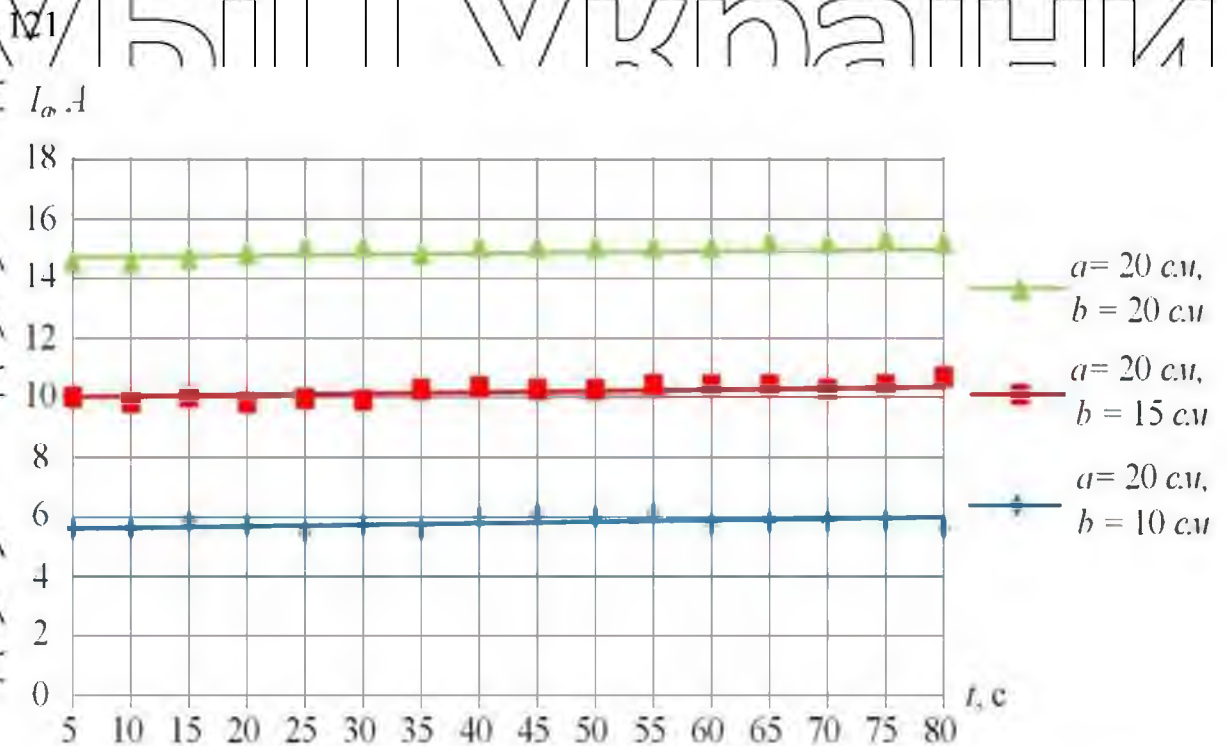


Рисунок 4.7 – Потоко-часові характеристики електродвигуна приводу електродвигуна для обробітку ґрунту

Для визначення питомих енерговитрат процесу основного обробітку ґрунту блоком електродвигуна з плугом використовуємо залежність

$$E_{\text{тот}} = \frac{P}{Q_v} \quad (4.17)$$

де епіт - питома витрата енергії, кВт·год / м<sup>3</sup>;

$Q_v$  - об'ємна продуктивність блоку двигуна, м<sup>3</sup> / год.

Значення об'ємної продуктивності блоку двигуна визначається рівнянням

$$Q_v = bv_n h \cdot 10^3, \quad (4.18)$$

де  $l$  - ширина блоку виявлення, м;

$v_n$  - лінійна швидкість руху блоку двигуна, км/год.

$h$  - глибина обробітку ґрунту, м

Таблиця 4.1

### Результати польових випробувань блоку електродвигуна

Прізвище індикатор, Розміри	Склад підрозділу								
	Мотоблок "МБ-КЕП" + плуг П1-20/2								
Умови випробування									
Дата проведення тесту	20.10.2018 (27.10.2018)								
Випробувальний майданчик (ферма)	Хутір Єнісей-7 с.Ботієве Приазовського району Запорізької області.								
Вид роботи	Основний обробіток ґрунту								
Попередній обробіток ґрунту	-								
Властивості поля	Дуга 0°								
Вологість ґрунту, %	19,4 (19,8)								
Твердість ґрунту, МПа	0,8 (1,0)								
Режими роботи блоку електродвигуна									
- Робоча ширина забору, м	0,2								
- швидкість, км/год.	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6
- Глибина обробки (середня), м	0,188. найчастіше (0,184)	0,192. найчастіше (0,191)	0,201 (0,201)	0,198. найчастіше (0,197)	0,21 (0,205)	0,21 (0,2)	0,192. найчастіше (0,19)	0,204 (0,21)	0,208 (0,22)
Енергоефективність блоку електродвигуна									
- потужність двигуна, кВт	0,88 (1,0)	1,05 (1,3)	1,24 (1,84)	1,43 (2,1)	1,6 (1,72)	1,75 (1,94)	2,02 (2,18)	2,47 (2,4)	1,4 (2,6)
- питома витрата енергії, 10-3 кВт·год / м <sup>3</sup>	45,07 (41,2)	46,5 (41,9)	47,7 (42,3)	48,6 (42,6)	49,5 (43,1)	50,6 (43,6)	51,9 (44,1)	53,3 (44,6)	54,01 (51,0)
- пробуксовування коліс, %	20,6 (20,7)	22,0 (22,3)	22,2 (22,5)	24,0 (24,2)	24,1 (24,4)	24,8 (25,1)	25,1 (25,3)	25,2 (25,5)	25,4 (25,6)

Отримано залежності споживаної потужності електрорушійного приводу електрорушійного агрегату для оранки ґрунту від швидкості руху (рис. 4.8), які характеризують умови польових випробувань.



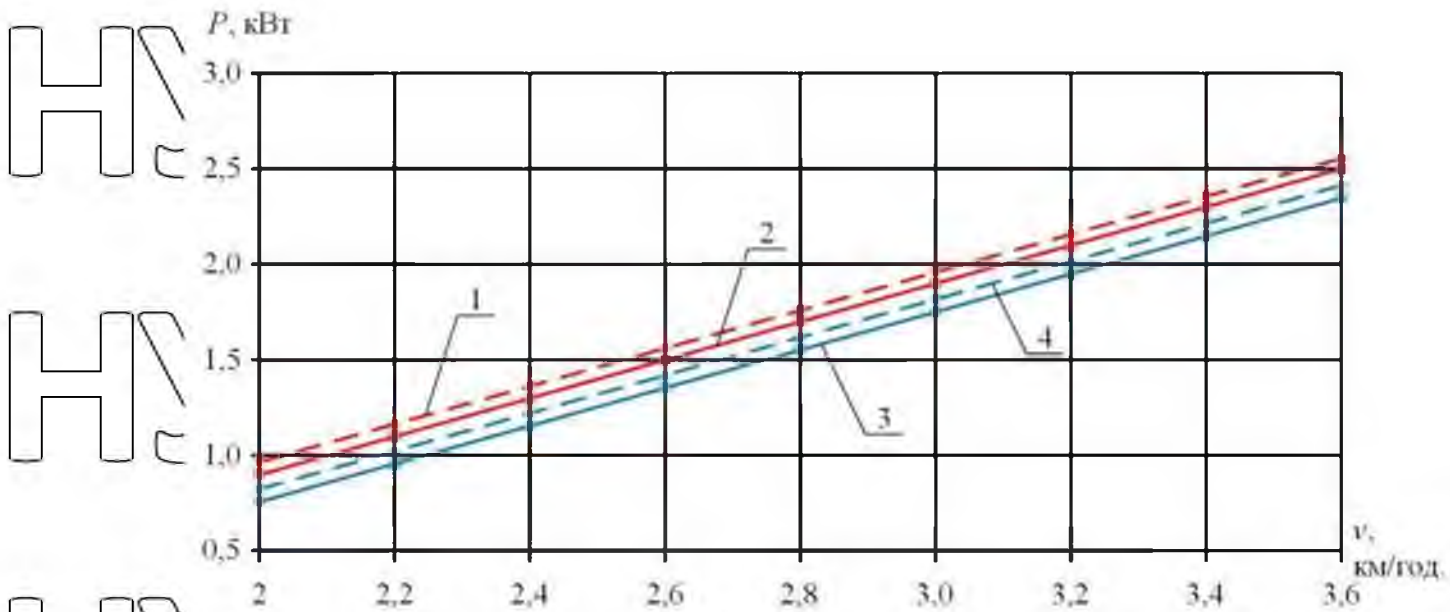


Рисунок 4.8 - Залежність орної потужності ґрунту  $P$  від швидкості  $v$  електродвигуна масою 100 кг при твердості ґрунту  $H = 1,0$  МПа: послідна (1) розрахункова (2); з твердістю ґрунту  $H = 0,8$  МПа: розрахункові (3) та дослідні

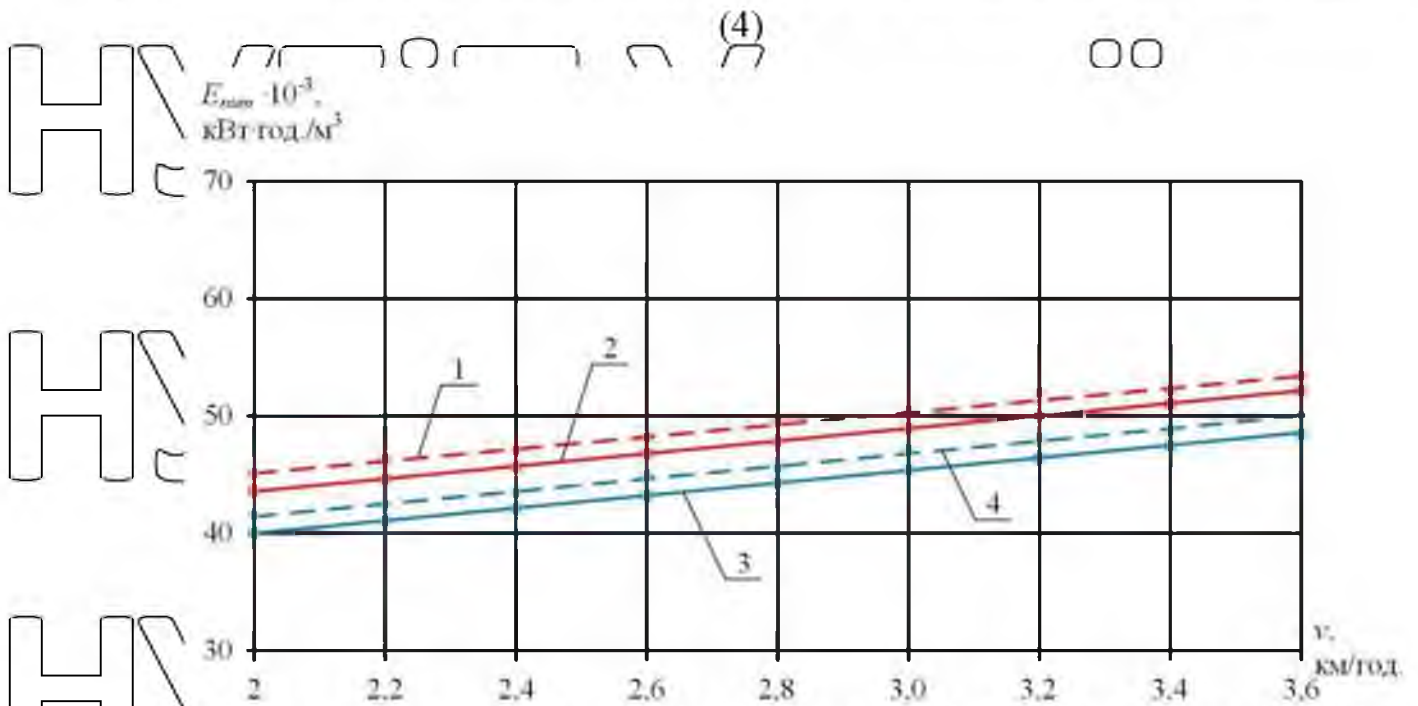


Рисунок 4.9 - Залежність питомої енергоємності епіт при оранці ґрунту від швидкості  $v$  електродвигуна масою 100 кг з твердістю ґрунту  $H = 1,0$  МПа: дослідна (1) і розрахункова (2); з твердістю ґрунту  $H = 0,8$  МПа: розрахункові (3) та експериментальні (4)

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# НУБІП України

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОТРАКТОРОМ

#### 5.1 Керування електричним трактором

НУБІП України

Система керування електротрактором показана на рис.1. 2.3.1.

Мінітрактор працює від двигуна BLDC. Рушійна сила передається на ведучі колеса і BOM через механізм трансмісії. Контролер відповідає за експлуатацію, управління та контроль трактора. З одного боку, керування електричним трактором визначає наміри водія за допомогою педалі акселератора, педалі гальма та вибору умов роботи, а потім керування електротрактором надсилає сигнали керування частотою обертання двигуна

НУБІП України

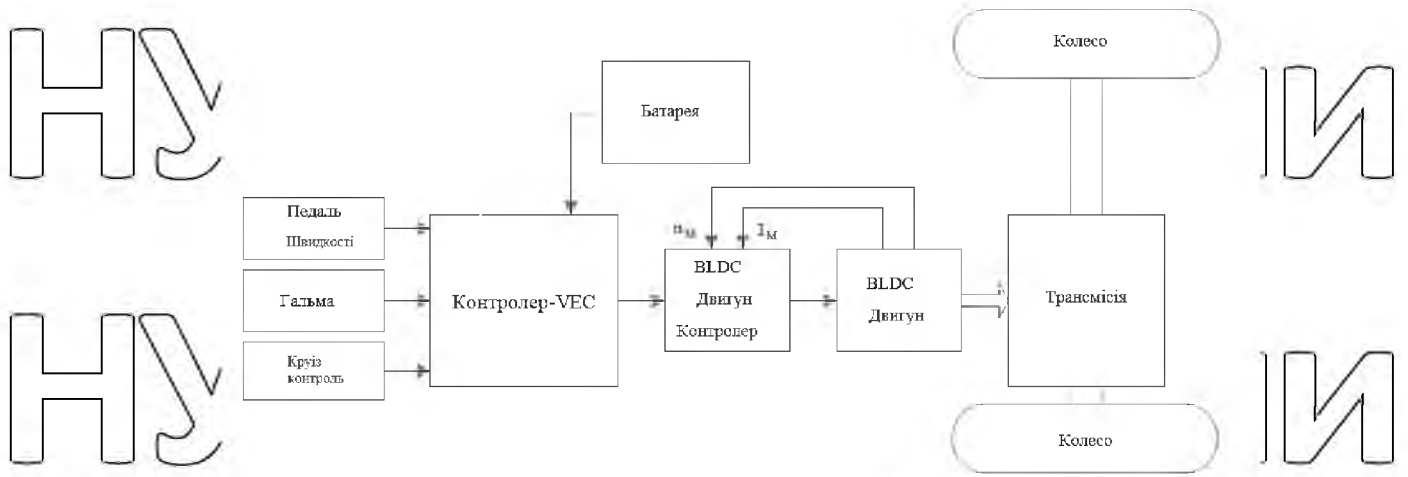
BLDC у відповідності з елементом керування стратегія. Контролер двигуна BLDC отримує сигнали керування швидкістю для керування двигуном, щоб він працював із заданою швидкістю. З іншого боку, керування електротрактором отримує сигнали від системи керування акумулятором, включаючи стан заряду акумулятора, струм розряду, напругу на клеммах і температуру. Тому управління електротрактором реалізує функції контролю та захисту. Система моніторингу брала під контроль струм, напругу та температуру двигуна та інших електроприладів, які одночасно надсилали ці сигнали на управління електротрактора для оцінки безпеки електрообладнання.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

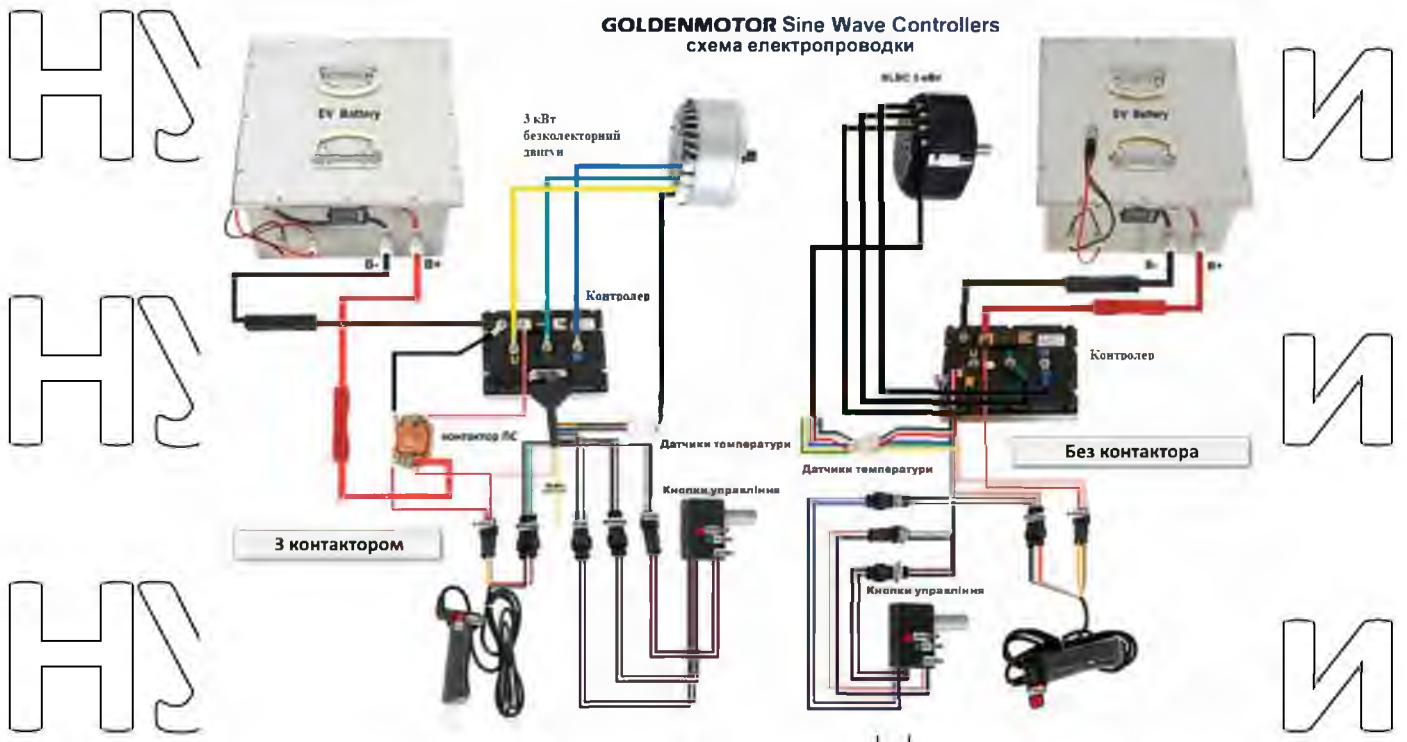
НУБІП України



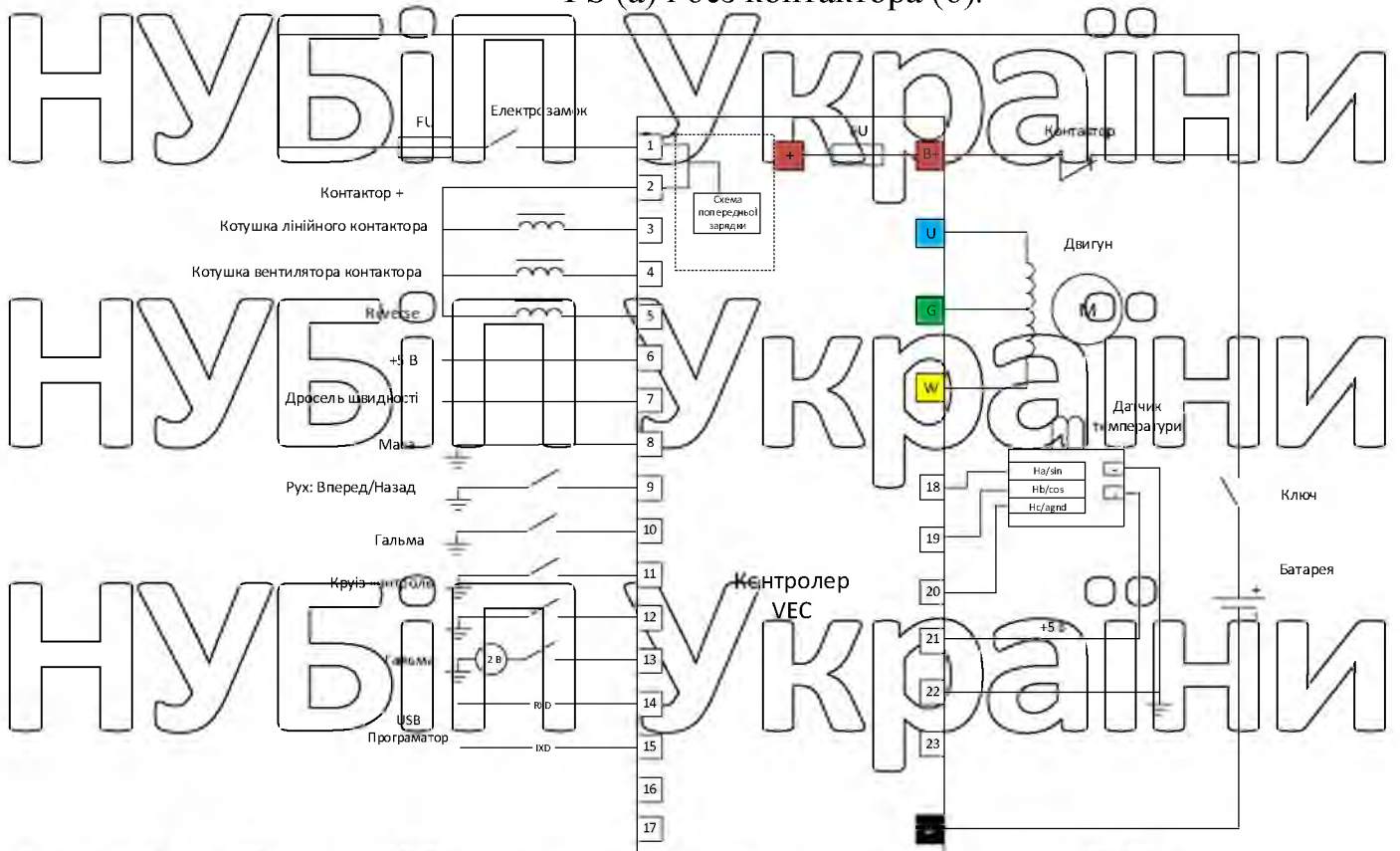
Боягузливий. 2.3.1 - Система керування електричним трактором

Управління двигуном електричного трактора має виконувати дві основні функції. По-перше, оскільки стабільність швидкості трактора мала відносний вплив на якість польових робіт, система керування двигуном повинна підтримувати швидкість трактора, постійно контролюючи задане значення швидкості. По-друге, керування приводом двигуна повинно регулювати струм двигуна та покращувати динаміку двигуна, оскільки трактор піддавався відносно сильним коливанням навантаження, що призводило б до коливань швидкості, це могло призвести до стрибка напруги двигуна і навіть пошкодження двигуна.





Боягузливий. 2.3.2 - Схема підключення синусного контролера з контактором PS (а) і без контактора (б).



Боягузливий. 2.3.3 - Принципова схема контролера

Активация гальма здійснюється шляхом замикання контактів в гальмівній накладці один з одним або шляхом подачі 12В від електричної системи автомобіля на відповідний вихід контролера.

Активувати реверс. Кінці «заднього» з'єднання повинні бути відкритими при русі вперед і закритими при їзді заднім ходом.

Для круїз-контролю звичайна кнопка самоповернення. Щоб перейти в режим круїз-контролю, натисніть і утримуйте, одночасно встановіть потрібну швидкість за допомогою дроселя, потім відпустіть кнопку і відпустіть дросель. Деактивація відбувається натисканням на гальмо або повторним поворотом поворотної ручки.

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

## 5.2 Програмування контролера VEC-500

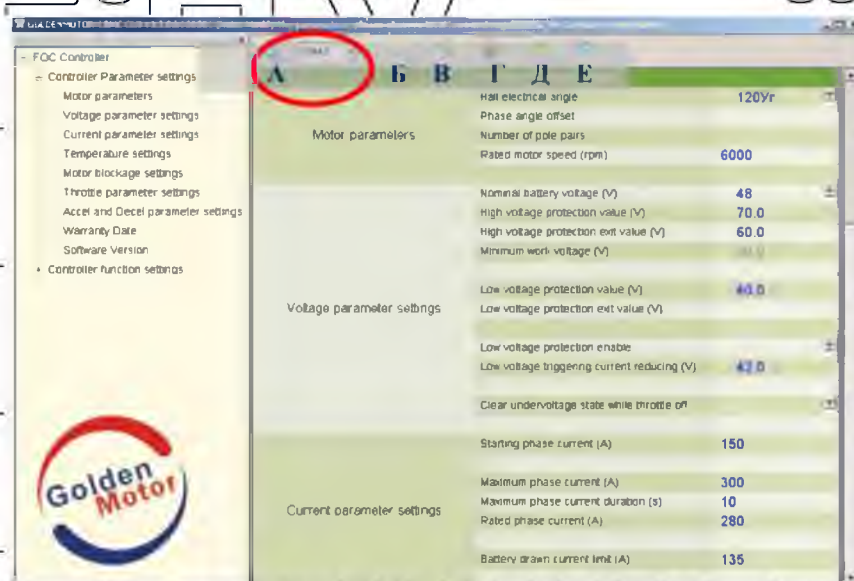


Рис. 2.4.1 - Вікно програмування керування

**Електричний кут залу** Фазовий зсув датчиків Холла (значення = 120 градусів, 60 градусів) Двигуни Golden Motor мають зсув фази = 120 градусів.

**Номинальна швидкість двигуна (об/хв)**- частота обертання двигуна (об/хв).

Виберіть 6000 об/хв.

**Номинальна напруга акумулятора (В)**- Номинальна напруга акумулятора.

Застосовуємо 48 В

**Значення захисту від високої напруги (В)**- Захист регулятора та АКБ: відключення при перевищенні максимально допустимої напруги. Вимкнено лише відновлення.

**Вихідне значення захисту високої напруги (В)**- Захист регулятора та АКБ: відключення при перевищенні максимально допустимої напруги. Коли акумулятор зарядиться, відновлення буде вимкнено, а контролер буде повністю захищений.

**Вихідне значення захисту від низької напруги (В)** - Захист регулятора та АКБ: відключення при перевищенні мінімально допустимої напруги.

**Значення струму відключення низької напруги (В)** - Зменшення споживання струму від акумулятора при низькій напрузі живлення.

**Пускова фаза струму (А)**- Пускова фаза струму (впливає на тягу і прискорення при старті). Ставимо на 300 А.

**Максимальний фазний струм (А)**- максимальний фазний струм. Ставимо на 300 А.

**Максимальна тривалість фазного струму (с)**- Тривалість роботи з максимальним фазним струмом. Ставимо 10 сек.

**Номинальний тривалість фазного струму (с)**- Номинальний постійний струм. Ми ставимо 280 А.



Поточне обмеження споживання батареї- Обмеження струму акумулятора.

Ставимо 135 А.



Боягузливий. 2.4.2 Вікно налаштувань контролера, датчики температури

двигуна

Активовано захист від перегріву двигуна - Запис - весело Ді

Налаштування температури: 1: Активувати - Активувати, 0:

Деактивувати - Деактивувати.

Струм двигуна кордану температура (Рівень 00 1)

Температурний ліміт в двигуні - рівень 1. Встановлюємо = 100 C.

Струм двигуна кордану температура (Рівень 2)

Температурний ліміт в двигуні - рівень 2. Встановлюємо = 110 3.

Максимальна температура захисту двигуна- Максимальний температурний захист. Ставимо = 120 3

Максимальна температура на виході захисту двигуна

Максимальний температурний захист при зупинці двигуна. Ставимо = 130 C.

Налаштування швидкості (педаль/ручка):

*Увімкніть захист діапазону напруги дроселя - Запис Функції*  
Налаштування цифр: 1: Активувати - Активувати, 0: Деактивувати  
вимкнути. Виключити для дросельної заслінки

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОТРАКТОРІВ

Багаторічний досвід і високий рівень теорії пересувної сільськогосподарської техніки дають змогу з достатньою точністю визначити їх найважливіші енергетичні та техніко-економічні показники при проведенні найважливіших польових робіт. Подібні дані з мобільних електрифікованих блоків не можуть бути повними та точними, оскільки досвіду їх розробки та експлуатації надто мало. З цієї причини при порівнянні економічної ефективності блоків двигунів з двигунів внутрішнього згорання та тягових електродвигунів не уникнути деяких спрощуючих припущень і середніх даних.

Для визначення економічності блоку двигуна за допомогою TED можна використовувати стандартний метод [86], згідно з яким річний економічний ефект нового обладнання визначається як різниця між зниженими витратами порівнюваних блоків двигунів з двигуном внутрішнього згорання та TED

$$E_p = B_m - B_e, \quad (6.7)$$

де  $E$  – очікуваний річний економічний ефект від блоку двигуна з TED;

$B_m, B_e$  – річна знижена вартість блоків двигунів з двигунами внутрішнього згорання та TED.

$$B_m = P_m + E_n \cdot k_m; \quad (6.8)$$

$$B_e = P_e + E_n \cdot k_e, \quad (6.9)$$

де  $P_m, P_e$  – річні експлуатаційні витрати на блоки двигунів з двигуном внутрішнього згорання, і TED, грн.;

$k_m, k_e$  – капітальні вкладення, що дорівнюють ринковій вартості блоків двигунів з двигуном внутрішнього згорання та TED,

грн.;

$E_{en}$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень

Згідно з [87,127], при оцінці ефективності дрібної механізації та автоматизації в сільськогосподарському виробництві  $E_n = 0,66 \dots 1$ . Для подальшого розрахунку беремо  $E_n = 0,8$ .

Річні експлуатаційні витрати на блоки двигунів, у свою чергу, можуть бути представлені двома складовими

$$P_m = C_m + C_{\text{пал.}}; \quad (6.10)$$

$$P_e = C_e + C_{ee}, \quad (6.11)$$

Де див.,  $C_e$  - постійні складові експлуатаційних витрат блоків двигунів, практично не залежать від витрат на електроенергію, включаючи, в загальному випадку, амортизаційні відрахування на капітальний ремонт і реконструкцію, витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування, інші прямі витрати, грн. ;

$S_p, S_{ee}$  - річна вартість палива для блоків двигунів з двигуном внутрішнього згоряння та електроенергії для блоків двигунів з ТЕД, грн.

Річна вартість рідкого палива визначається виразом

$$C_n = P_n \cdot q \cdot T_p \cdot \eta \cdot C_n, \quad (6.12)$$

де  $P_n$  - номінальна потужність двигуна блоку двигуна, кВт;

$q$  - питома витрата рідкого палива, л / (кВт·год);

$T_p$  - річний час роботи блоку двигунів у теплиці та на відкритому повітрі,

Рік;

$\eta$  - Коефіцієнт використання потужності двигуна внутрішнього згоряння при виконанні основного технологічного процесу - оранки ґрунту. Приймає  $\eta = 0,7 \dots 0,8$ .

$C_n$  - Вартість літра рідкого палива, грн

Вартість електроенергії для блоку двигуна можна визначити за виразом

$$C_{ee} = \frac{P_n \cdot k_z}{\eta \cdot K_{e.m.}} \cdot T_p \cdot C_e, \quad (6.13)$$

де  $P_n$  - номінальна потужність блоку двигуна ТЕД, кВт,

концентраційний табір- Коефіцієнт навантаження TED. Прийнято  $k_z = 0,86$ ;

$\eta_n$  - номінальний ККД ТЕД блоку двигуна, д.

$\eta_{003}$ - Коефіцієнт, що враховує втрати потужності в мережі живлення та в гнучкому кабелі. Приймаємо  $\eta_{em} = 0,96$  [48];

$C_e$  - Тарифна ціна 1 кВт·год електричної енергії встановлюється НКРЕКП України на звітний рік.

У першому наближенні постійні складові експлуатаційних витрат, які не пов'язані з витратою електроенергії та палива при експлуатації блоків двигунів, можна порівняти для обох порівнянних варіантів, тобто.

$C_m = C_e$ . (6.14)

У результаті вираз (6.7) з урахуванням (6.14) має вигляд

$$E_p = (C_n + E_n K_m) - (C_{e.e.} + E_n K_e). \quad (6.16)$$

Вихідні дані для розрахунків.

Таблиця 6.3

### 1. Технічні властивості порівнюваних варіантів блоку двигуна

Бренд МВ	паливо	Потужний Несс, кВт	Питома витрата палива, л /кВт·год	Вартість /МБ, грн	Вага МБ, кг
МК-1А-01	А-92	3.9	0,42	10400	80
МВ-2060-D4	DP	4.2	0,394.	9800	128
МБКЕП, ТДАТУ	Електричний енергії	2.6	-	16900	100

2. Розрахунковий час роботи блоків двигунів протягом року в теплицях та на присадибних ділянках приймається  $T_p = 1000$  год.

НУБІП УКРАЇНИ



3. Вартість 1 кВт\*год. Електроенергію приймають за тарифом для агропромислових об'єктів, встановленим НКРЕ України на 2020 рік Див. 1,68 грн/кВт\*год.

4. Орієнтовна вартість одного літра рідкого палива ПІ приймається однаковою: для ДТ-26 грн/л. і А-92-26 грн/л.

Розрахунок річного економічного ефекту електродвигунового агрегату.

Річні витрати на рідке паливо та електроенергію для порівнюваних варіантів блоку двигуна (6.12) і (6.13) та базові дані є:

- до МВ Mole МК-1А-01:

$$C_{n,1} = 3,9 \cdot 0,42 \cdot 1000 \cdot 0,75 \cdot 25 = 30712 \text{ грн.}$$

для МВ-2060-D4:

$$C_{n,2} = 4,2 \cdot 0,394 \cdot 1000 \cdot 0,75 \cdot 25 = 31027 \text{ грн.}$$

- для МВ-КЕР:

$$C_{e.e.} = \frac{2,5 \cdot 0,85}{0,8 \cdot 0,95} \cdot 1000 \cdot 1,68 = 4697 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект блоку електродвигуна згідно (6.7) з урахуванням (6.8) - (6.14) та вихідних даних порівняно з блоком двигуна Кріт

МК-1А-01

$$E_{p,1} = (30712 + 0,8 \cdot 10400) - (46977 + 0,8 \cdot 16900) = 20815 \text{ грн.},$$

і в порівнянні з блоком двигуна МВ-2060-D4:

$$E_{p,2} = (31027 + 0,8 \cdot 9800) - (4697 + 0,8 \cdot 16900) = 20650 \text{ грн.},$$

Розрахунковий термін окупності електродвигуна з ТЕД у порівнянні з двигуном з двигуном внутрішнього згорання визначається як співвідношення

$$T_1 = \frac{\Delta K_{m1}}{E_{p,1} \cdot k_s} \quad \text{і} \quad T_2 = \frac{\Delta K_{m2}}{E_{p,2} \cdot k_s}, \quad (6.16)$$

Де  $\Delta K_{mi}$  - різниця між капітальними вкладеннями або вартістю блоків двигунів МВ-КЕР і Кріт МК-1А-01;

$\Delta K_{\text{м.2}}$  - різниця між капітальними вкладеннями або вартістю блоків двигунів МБ-КЕП і МБ-2060-Д4;  
 $k_e$  - Ступінь використання блоку двигуна протягом року, ефективний

Оскільки блок двигуна експлуатується 2,6 місяця на рік,  $k_e = 0,22$ ;

$T_1 = \frac{(16900 - 10400)}{20815 \cdot 0,22} = 1,42$  року;

$$T_2 = \frac{(16900 - 9800)}{20650 \cdot 0,22} = 1,56 \text{ року.}$$

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## ВИСНОВКИ

НУБІП України

У цій складній магістерській роботі мінітрактор Білорусь-132Н був переобладнаний з двигуна внутрішнього згоряння GX390 на електродвигун

BLDC потужністю 3 кВт.

НУБІП України

Враховано історію розвитку, стан та перспективи електротракторів як зарубіжного, так і вітчизняного виробництва.

Дослідження принципу функціонування електродвигуна та стратегії

НУБІП України

керування на основі контролера VEC-500 від Golden Motors та його програмування.

Проведено теоретичне дослідження щодо обґрунтування параметрів міні

НУБІП України

трактора.

Дослідження моніторингу швидкості приводного двигуна шляхом моделювання в програмі Simulink MatLab.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Олійник В. С. Жулай Є. Я. і др. Довідник сільського електрика., 3-є видання перероблене і доповнене, К.: Урожай, 1989.

2. Будзко И. А., Зуль Н. М. Электроснабжение Сельского хозяйства., М.: Агропромиздат, 1990.

3. Чміль А. І., Лут М. Т. Безпека праці в сільсько-господарських установках, Київ, Урожай, 1996р.

4. ДСТУ ІЕС 60050-161-2003 Словник електротехнічних термінів.

Глава 161. Електромагнітна сумісність (ІЕС 60050-161:1990, ІДТ)

5. ДСТУ EN 60204-1:2004 Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:1997, ІДТ)

6. Паливно-енергетичний комплекс України: <http://www.energo.net.ua>

7. Назаров Г.І., Олійник Н.П., Фоменков А.П., Юровський І.М. Основи електроприводу і застосування електричної енергії в сільському господарстві. М.: Колос, 1965. 392с.

8. Дідманідзе О.Н., Іванов С.А., Іволгин В.А. Трактор з комбінованою енергоустановкою // Сільський механізатор. 2008. № 11. С. 6-7

9. Борін К. Автономний або електричний трактор: бачення за майбутнє. URL: <http://www.agbz.ru/articles/avtonomnyiy-ili-elektricheskiy-tractor-srafenie-za-budushee>

10. Електротрактор MOBEL Веб сайт:

<https://www.youtube.com/watch?v=2wy6ZdToKiE> (дата звернення: 18.03.2021)

11. Study on the Development of the Electric Tractor: Specifications and Traveling and Tilling Performance of a Prototype Electric Tractor Веб сайт: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1881836613800031>

(дата звернення: 18.03.2021)

12. Загіннаїлюв В. І., Андреев С. А. История развития, состояние и перспективы применения техники в полеводстве. Агроинженерия. 2017. № 6. с. 15-22.

13. Житков А. Електротрактори та електромобілі – історія довжиною у майже 200 років. Агропрофі. 2019. № 9 (429). URL: [http://www.tsatu.edu.ua/wp-content/uploads/agroprofi\\_09.pdf](http://www.tsatu.edu.ua/wp-content/uploads/agroprofi_09.pdf) (дата звернення 11.10.2021).

14. HPC Series Brushless DC Motor Controller User Guide URL: <https://www.goldenmotor.com/HPC%20Series%20Controller%20User%20Guide.pdf> (дата звернення 11.10.2021).

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України