

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 631.371:621.31

**ПОГОДЖЕНО**  
Директор ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження

проф., д.т.н. \_\_\_\_\_ **КАПЛУН В.В.**  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
Завідувач кафедри  
електротехніки, електромеханіки та  
електротехнологій

доц., к.т.н. \_\_\_\_\_ **ОКУШКО О.В.**  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему: **«ОБГРУНТУВАННЯ 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**

\_\_\_\_\_ **К.Т.Н., ДОЦЕНТ**  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Усенко С.М.**  
(ПІБ)

**Керівник магістерської роботи**

\_\_\_\_\_ **К.Т.Н., ДОЦЕНТ**  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Синявський О.Ю.**  
(ПІБ)

**Виконав**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Божинський С.В.**  
(ПІБ)

**КИЇВ – 2024**

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**  
**електротехніки, електромеханіки та**  
**електротехнологій**

к.т.н., доц. \_\_\_\_\_ **Окушко О.В.**

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**  
**СТУДЕНТУ**

**Божинському Сергію Володимировичу**

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської роботи: «Обґрунтування параметрів електротехнічного комплексу малої механізації на базі міні трактора»

затверджена наказом ректора НУБіП України від 26.09.2024 № 1666”С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 15. 11 .2024

Вихідні дані до магістерської роботи: «Правила улаштування електроустановок»; «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів»; «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»; матеріали практики.

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 27.09.2024

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_ **Синявський О.Ю.**

(підпис)

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ **Божинський С.В.**

(підпис)

(ПІБ)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота складається з 79 сторінок, 28 ілюстрацій, 5 таблиць, 42 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 сільськогосподарського призначення.

Наведена технічна характеристика міні-трактора Беларус 132Н та досліджено принцип роботи безколекторного двигуна.

Досліджено вплив експлуатаційних показників та тягових характеристик на параметри регулювання, розрахункову і номінальну потужності приводного електродвигуна при оранці ґрунту.

Теоретичними дослідженнями встановлено раціональні параметри електротрактора при обробі ґрунту. Це дозволило отримати критерій оптимізації - тягове зусилля на рівні 1,5 – 3,0 кН .

Досліджено вплив швидкості руху трактора на потужність та питому енергоємність оранки ґрунту.

Розроблена система керування електротрактором на базі мікроконтролера VEC-500 та запрограмовані режими роботи електротрактора.

Річний економічний ефект від впровадження розробленого електротрактора складає 22,26 тис. грн. при терміні окупності 0,84 року.

**Галузь застосування** – сільськогосподарське виробництво.

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

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 .....	9
СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ .....	9
РОЗДІЛ 2 .....	15
ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	15
2.1 Загальна характеристика міні-трактора Беларус-132Н .....	15
2.2. Принцип роботи двигуна BLDC і стратегія керування.....	17
РОЗДІЛ 3 .....	21
ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОТРАКТОРА .....	21
3.1 Аналіз тягових характеристик і параметрів регулювання електротрактора	21
3.2 Розрахунок потужності і вибір тягового електродвигуна електротрактора .	30
3.2.1 Вибір тягового електродвигуна за родом струму .....	31
3.2.2 Розрахунок потужності і вибір тягового електродвигуна .....	33
3.2.3 Вибір передавального відношення редуктора .....	36
3.2.4 Перевірка тягового електродвигуна привода електротрактора .....	37
3.3 Теоретичні дослідження характеристик регулювання тягового електродвигуна .....	41
РОЗДІЛ 4 .....	47
ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОТРАКТОРА .....	47
4.1 Методики експериментальних досліджень .....	47
4.1.1 Методика визначення твердості ґрунту.....	47
4.1.2 Методика визначення вологості ґрунту.....	47
4.1.3 Методика енергетичної оцінки роботи електротрактора.....	48
4.1.4 Визначення раціональних параметрів електротрактора .....	49
4.2 Аналіз результатів визначення раціональних параметрів електротрактора .	55
4.3 Аналіз результатів польових досліджень електротрактора.....	62
РОЗДІЛ 5 .....	66
РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТРАКТОРОМ.....	66
5.1 Система керування електричним трактором.....	66
5.2 Програмування контролера VEC-500 .....	68
РОЗДІЛ 6 .....	71
ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОТРАКТОРА .....	71
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

## ВСТУП

За останні роки в Україні кількість фермерських господарств та приватних землекористувачів значно зростає. У той же час сильно розвинулось овочівництво захищеного ґрунту. З метою підвищення ефективності овочівництва широкого застосування отримали малогабаритні мобільні агрегати у вигляді мотоблоків та міні-тракторів з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ) вироблені в країні та за кордоном. Взагалі, мотоблоки з двигунами внутрішнього згорання характеризуються як ефективний засіб невеликої механізації трудомістких процесів, особливо - основного процесу землеробства. Однак під час роботи міні-тракторів з ДВЗ в теплицях рівень шуму та забруднення вихлопними газами повітря збільшуються, що негативно впливає не тільки на людей, а й на рослини. До недоліків мотоблоків з ДВЗ також можна віднести високу питому витрату рідкого палива, високу вартість, складність при пуску та зупинці агрегату, а також відносно малу надійність двигунів внутрішнього згорання.

Проведені попередні дослідження показали, що мобільні агрегати з тяговими електродвигунами (ТЕД) перспективні для експлуатації у спорудах захищеного ґрунту є, які екологічно чисті агрегати, що не страждають від раніше названих недоліків. Крім того, заміна двигуна внутрішнього згорання на нерегульований електропривод з асинхронним двигуном не дозволяє забезпечити необхідний діапазон регулювання швидкості руху агрегату, а також високі енергетичні показники роботи електромінітрактора.

Вивчення таких енергетичних засобів обробітку ґрунту є важливим у південному регіоні України.

*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.

*Задачі дослідження:*

1. Провести аналіз існуючих конструкцій електротракторів та способів їх електроживлення.
2. Провести оптимізацію потужності і лінійної швидкості електротрактора з урахування критерію оптимізації – тягового зусилля трактора.
3. Дослідити характеристики регулювання та обґрунтувати режими керування тяговим електродвигуном електротрактора.
4. Обґрунтувати систему керування тяговим електродвигуном електротрактора.
5. Провести техніко-економічну оцінку роботи електротрактора.

**Апробація результатів роботи. Публікації.**

1. Божинський С.В., Синявський О. Ю. (2023). Підстанції майбутнього: інноваційні технології та перспективи розвитку. *Молодий вчений*, 8 (120), 1-4. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2023-8-120-1>.
2. Бодинський С.В., Синявський О.Ю. Електротехнічний комплекс малої механізації на базі міні-трактора. Тези доповідей 77-тої науково-практичної конференції студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК, м. Київ, 25 квітня 2024 р. С.62.

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Звертаючись до історії землеробської механіки поточного сторіччя, неможливо не відзначити видатні досягнення вітчизняних конструкторів, які продовжували роботи в області створення мобільної сільськогосподарської техніки для потреб рільництва. Серед цих робіт особливе місце займають дослідження з використання електричної енергії для забезпечення руху сільськогосподарських машин. Знання історії розвитку питання дозволяє проводити паралелі між вчорашнім і сьогоднішнім днем, переймати позитивний досвід наукових шкіл і підтримувати методологічні принципи відомих вчених.

З початком епохи машинного землеробства тягове зусилля забезпечувалося тракторами, які приводилися в рух двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ). Однак практично одночасно з розробкою традиційних тракторів стали з'являтися різноманітні машини, в яких тягове зусилля створювалося електродвигунами. По суті ці машини з'явилися прообразами нових технічних засобів, які отримали свій розвиток в електролебідках і електротракторах.

У електролебідках двигун встановлювався стаціонарно, а плуг приводився в рух за рахунок троса. У електротракторах двигун розташовується на самохідному шасі, яке переміщається по полю і забезпечує рух плуга.

Найбільш перспективним напрямком представляється розвиток електротракторної техніки. На відміну від електролебідок, трактори мають більш високу маневреність і універсальність.

Спроби створення електротрактора з електропостачанням по кабелю були зроблені в Радянському Союзі в кінці 20-х рр. У період з 1930 по 1956 р були розроблені і випробувані більше двадцяти конструкцій електротракторів на змінному і постійному струмі з кабельним живленням. Замість традиційного ДВС на шасі трактора встановлювався електродвигун і спеціальні пристрої, що забезпечують намотування і розмотування кабелю. Крім того, до складу

агрегатів входили струмозйомники, апаратура управління, пересувні електричні підстанції та польові повітряні лінії електропостачання.

Основними перевагами електротракторів були:

- постійна готовність до роботи, швидке включення і відключення, незалежність від температури навколишнього середовища;
- високе короткочасне перевантаження електродвигуна;
- значна економія робочої сили в електротракторних бригадах, підвищений моторесурс (кілька десятків тисяч годин проти тисячі годин у ДВС);
- незмінність потужності електродвигуна після ремонту;
- економічність (середня витрата електроенергії становить 45 кВт · год на 1 га м'якої оранки);
- екологічність, відсутність шуму.

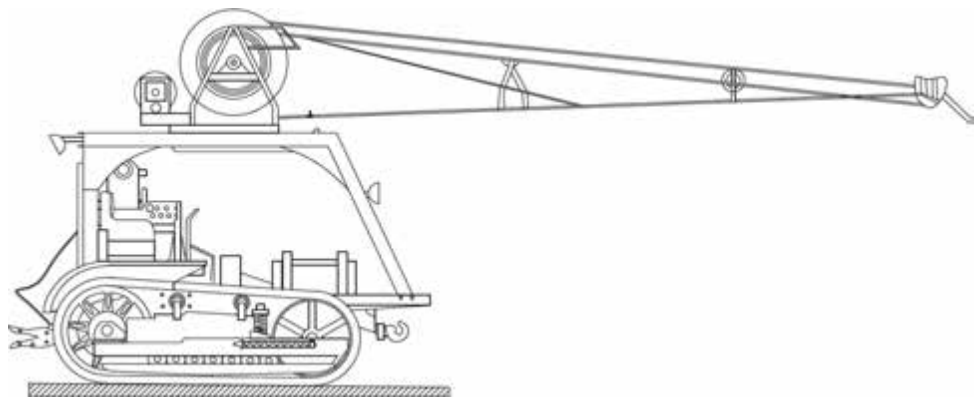


Рис. 1.1. Конструкція електротрактора

Для прийому кабелю на тракторі використовували стрілу з кабельним барабаном. При русі мобільного електроагрегату до пересувної трансформаторної підстанції кабель намотували на барабан за допомогою спеціального електродвигуна, а при русі в протилежну сторону - розмотували. Кабелеприёмная стріла піднімалася над кабіною електроагрегату і використовувалася не тільки для прийому кабелю, а й для забезпечення електробезпеки, відводячи його від агрегатуються сільськогосподарських машин і знарядь (рис. 1.1).

Перша конструкція гусеничного електротрактора була розроблена на базі дизельного трактора ЧТЗ-60. Потужність електродвигуна складала 35 кВт при напрузі 1000 В. Живлення електродвигуна трактора здійснювалося по гнучкому шланговому кабелю довжиною 800 м. Обертю стріла піднімала кабель над трактором і укладала його на відстані до 5 м від борозни. Ця конструкція електротрактора виявилася непрацездатною внаслідок своєї технічної недосконалості.

Перший працездатний електротрактор під маркою ВІМЕ-2 з'явився в 1937. Ця конструкція була створена також на базі трактора ЧТЗ-60, у якого двигун внутрішнього згоряння був замінений електричним двигуном трифазного струму потужністю 48 кВт на робочу напругу 500 В. Над електродвигуном був встановлений кабельний барабан, що вміщає 750 м гнучкого кабелю з гумовою ізоляцією.

Позитивними результатами роботи електротракторів ВІМЕ-2 була доведена технічна можливість практичного використання електротяги машин типу трактора на польових с.г. роботах із застосуванням кабельного способу живлення.

Основні переваги електротрактора в порівнянні з трактором з тепловим двигуном наступні: хороші тягові властивості і надійність роботи тягового електродвигуна; простота технічного обслуговування і легкість пуску, економія часу і робочої сили через непотрібність підвезення, а також заправки паливом та водою.

Недоліки електротрактора в порівнянні з дизельними тракторами наступні: великі початкові капіталовкладення; дещо менша маневрена здатність через кабель; недостатня на той час довговічність роботи живильного кабелю, а також його висока вартість по відношенню до вартості всього електротрактора, в необхідності в тракторі з тепловим двигуном для перевезення електротракторних агрегатів з ділянки на ділянку поза польових електричних мереж; підвищена вага електротрактора в порівнянні з трактором на 1-2 т, викликаний вагою конструкції барабанної групи, електроприводу для

намотування кабелю і великої кількості роликів, необхідних для направлення кабелю на барабан.

В даний час перед сільгоспмашинобудування стоїть питання про можливість переходу на інші альтернативні види палива, з метою екологізації та зниження витрат на ПММ.

Незважаючи на труднощі, сільгоспмашинобудівники продовжують вдосконалення силових установок, і як варіанти розглядають використання повністю електричних силових установок, які встановлюють на самохідні с/г машини.

Таким чином, в даний час актуальними є дослідження, присвячені обґрунтуванню експлуатаційних параметрів тракторів, експлуатованих на двигуні з застосуванням електричної силової установки на техніко-економічну оцінку при роботі технологічних процесів.

За кордоном виробники на великих міжнародних виставках автономних і електричних тракторів, які не потребують участі водія в обробці полів, привернули широку увагу сільгоспвиробників. Однією з представлених недавно подібних розробок став концепт агрегату найбільшого в світі виробника сільгосптехніки John Deere, який представив прототип трактора на електротязі.



Рис. 1.2. Електротрактор John Deere SESAM

Оснащена батареями на 130 кВт\*год модель SESAM, що використовує тільки електротягу - замість дизельного мотора під капотом встановлено акумуляторів на 130 кВт\*год і два електродвигуни по

150 кВт. На відміну від своїх дизельних побратимів трактор практично не видає шуму. Також, модель на електротязі простіше ремонтувати, так як в ній менше деталей.

Крім того, фермери зможуть заощадити на паливі. В даний час повний заряд батареї забезпечує роботу на протязі близько 4-х годин в нормальних умовах експлуатації або запас ходу близько 55 км. Час його зарядки триває приблизно 3 години. Тривалість життя батареї становить близько 3100 циклів.

Серед найбільш популярних моделей таких агрегатів варто відзначити варіант українського виробництва ХТЗ «Edison». Він відрізняється потужністю в 40 л. с., має задній привід і батареї в 24 кВт.



Рис. 1.3. Електротрактор ХТЗ «Edison»

ХТЗ Edison розроблений спільно з компанією «АвтоЕнтерпрайз» на базі серійного ХТЗ-3512 та на сьогоднішній день не має аналогів в світі. Для повної зарядки акумуляторів необхідно від 2 до 4 годин від зарядного пристрою і від 8 до 10 годин від електромережі 220 В. В режимі руху електротрактор «Edison»

зможе працювати до 8 годин, якщо тягова установка буде задіяна додатковими навантаженнями - то заряду батарей вистачить до 4 годин роботи.

Одночасно з цим при використанні вітчизняного та зарубіжного досвіду в області електричних накопичувачів енергії в МТА стає можливим випробування і застосування електричної силової установки на даному тракторі, що дозволить підвищити коефіцієнт корисної дії передачі потужності до виконавчих органам, над чим проводяться дослідження в даний момент.

Виконання технологічних процесів в рослинництві трактора оснащеного силовою електричною установкою повинно забезпечити економію нафтопродуктів, поліпшення екології, виключення токсичних викидів, раціональне використання графіка навантажень енергосистеми в весняно-літній період, а також можливість автоматизації та вдосконалення технологічних процесів.

Таким чином, сільськогосподарське машинобудування повільними, але впевненими кроками рухається до епохи електричних аграрних машин, які будуть поступово проникати в сільське господарство і в майбутньому змінять його докорінно.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 2.1 Загальна характеристика міні-трактора Беларус-132Н

Магістерська кваліфікаційна робота передбачає переобладнання міні-трактора Берарус-132Н з двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) на безколекторний електродвигун постійного струму.



Рис. 2.1. Загальний вигляд міні-трактора Belarus 132Н

Міні-трактор Беларус-132Н призначений для виконання різних сільськогосподарських робіт з навісними, напівнавісними, причіпними та стаціонарними машинами та знаряддями: оранки легких ґрунтів, боронування, культивуації, міжрядної обробки картоплі та буряків, внесення мінеральних добрив, покос трав, прибирання вулиць та територій сміття і снігу, засипка ям і траншей, сінокошіння, транспортування вантажів, стаціонарних робіт з приводом від валу відбору потужності, а також для застосування в садах та городах, на присадибних ділянках тощо може застосовуватися для транспортування вантажів, а також для різних робіт з використанням стаціонарних агрегатів та установок із приводом від ВОМ, наприклад, деревообробних агрегатів, насосів.

## Технічна характеристика трактора Belarus 132Н

### Двигун

Тип	Бензиновий, А-92
Модель	GX390 (HONDA)
Потужність двигуна, кВт (к.с.)	8,7 (11,8)
Число цилиндрів, шт.	1
Питома витрата палива, г/кВт·год	313

### Трансмiсія

Муфта	Багатодискова
Коробка передач	Ступінчаста, механічна
Число передач: вперед/назад	4/3
Швидкість руху: вперед/назад	2,83 - 17,72/4,03 - 12,94

### Розміри і маса

Довжина загальна, мм	2500
Ширина, мм	1000
Висота, мм	2000
Колія, мм	600
Маса, кг	532
Колісна формула	Ширина, мм

У тракторі система пуску електростартерна від акумуляторної батареї та ручна. Привод на всі чотири колеса. Коробка передач механічна, східчаста. Шарнірна рама. Заднє гідронавішування. Працює на двох швидкостях вал відбору потужності, що дозволяє використовувати машину для приведення в дію різних механізмів та пристроїв. Працює із широким спектром навісного обладнання.

Встановлено, що потужність, необхідна для привода трактора на холостому ході становить 5, 5 кВт.

У цьому міні-тракторі передбачається встановлення безколекторного електричного двигуна постійного струму потужністю 8 кВт на базі контролера-VEC компанії Golden Motors з контактором ПС і батареєю на 48 В.

## 2.2. Принцип роботи двигуна BLDC і стратегія керування

Вентильний (безколекторний, безщітковий) електродвигун - це синхронний двигун, заснований на принципі частотного регулювання з самосинхронізацією, суть якого полягає в управлінні вектором магнітного поля статора залежно від положення ротора. Вентильні двигуни (в англійській літературі BLDC або PMSM) ще називають безколекторними двигунами постійного струму, тому що колектор такого двигуна зазвичай живиться від постійної напруги.

Безщітковий двигун постійного струму (BLDC) широко використовується в галузі автомобілебудування, що володіє перевагами високої ефективності, високої щільності потужності, потужних перевантажень та високого пускового моменту.

Двигун BLDC розроблений за принципом звичайного двигуна постійного струму з використанням електронної комутації замість механічної комутації, тому має просту конструкцію та потребує менших витрат на обслуговування. Ці переваги відповідають технічним вимогам приводу електричного трактора.

Двигун BLDC працює на основі електронної комутації. Як показано на рис. 2.2, статор двигуна з трифазними обмотками з'єднаний трифазним джерелом напруги інвертором з шістьма силовими вимикачами. Датчики Холла використовувалися для визначення положення ротора двигуна та відправлення сигналів положення. Інвертор вмикав або вимикав за правилом, таким чином, трифазні обмотки статора двигуна були включені послідовно і створювали обертове магнітне поле, щоб приводити в рух ротор двигуна.

Типові форми сигналів зворотної ЕРС та фазного струму трифазного двигуна BLDC наведено на рис. 2.3, вісь X якого представляла кут повороту ротора двигуна. Приблизно, зворотна ЕРС на фазу була постійною для 120 електричних градусів, вперед і назад 60 електричних градусів з яких були лінійно

з кутом ротора. Для отримання стабільної швидкості та крутного моменту фазні обмотки могли пропускати струм лише під час плоскої частини зворотної ЕРС. Тому двигун комутує між фазними обмотками кожні 60 електричних градусів.

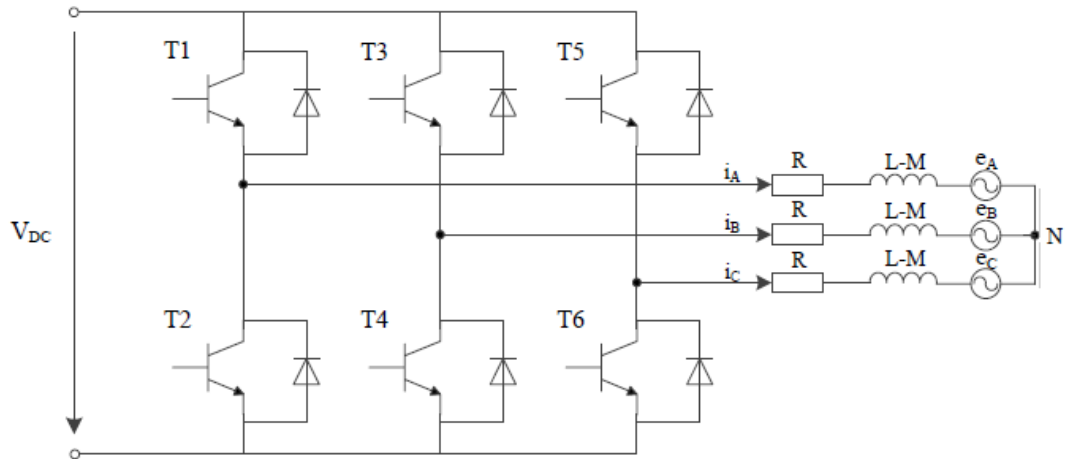


Рис. 2.2. Принципова схема приводу двигуна BLDC

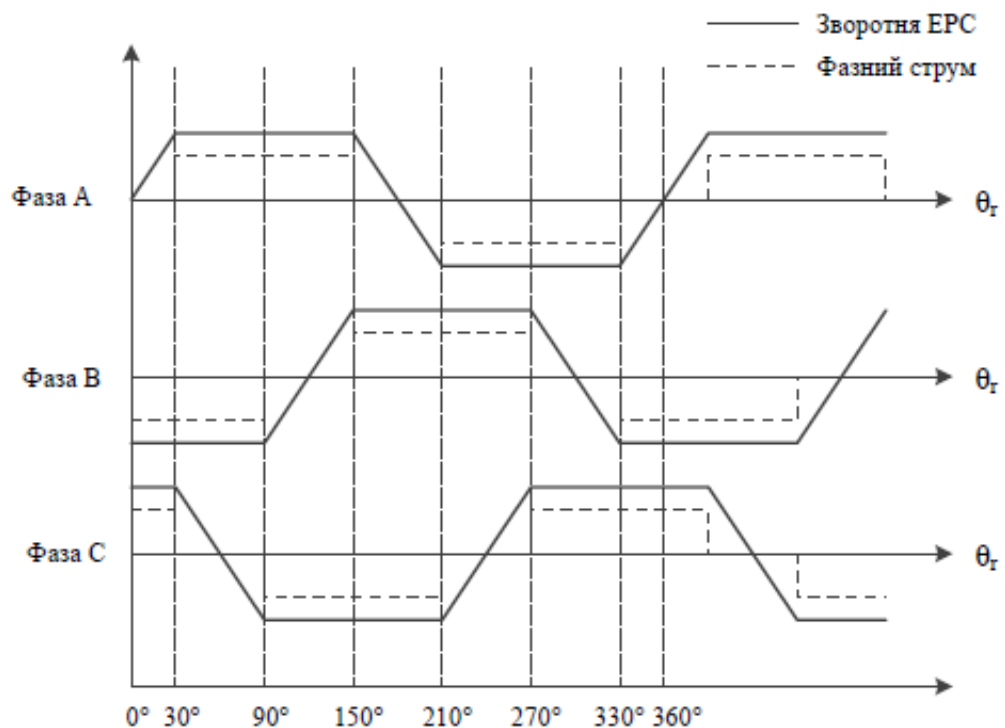


Рис. 2.3. Типова форма хвилі трифазного електродвигуна BLDC зворотної ЕРС і фазного струму.

Двигун був увімкнений за допомогою 2 перемикачів, один на стороні високого рівня, а інший на стороні низького рівня. Тому дві фазні обмотки були

з'єднані послідовно через шину постійного струму. Кожна комутація двигуна змінювала стан одного з перемикачів, таким чином, кожен перемикач залишається увімкненим протягом 120 електричних градусів. Послідовність увімкнення в циклі 360 електричних градусів була: T1T6-T3T6-T3T2-T5T2-T5T4-T1T4-T1T6, як показано на рис. 2.4. Для правильної комутації положення ротора має бути точно визначено. Для визначення положення ротора використовувалися датчики Холла. Вони були встановлені в різниці фаз 120 градусів. Кожен датчик підтримував високий рівень протягом 180 електричних градусів за цикл, як показано на рис. 2.2.3, вісь X якого представляла кут повороту ротора. Кожен датчик Холла надсилав двійкове число одночасно, таким чином, у циклі 360 електричних градусів буде шість станів. Стан датчиків Холла та відповідні активні перемикачі були такими, як показано в таблиці 2.1.

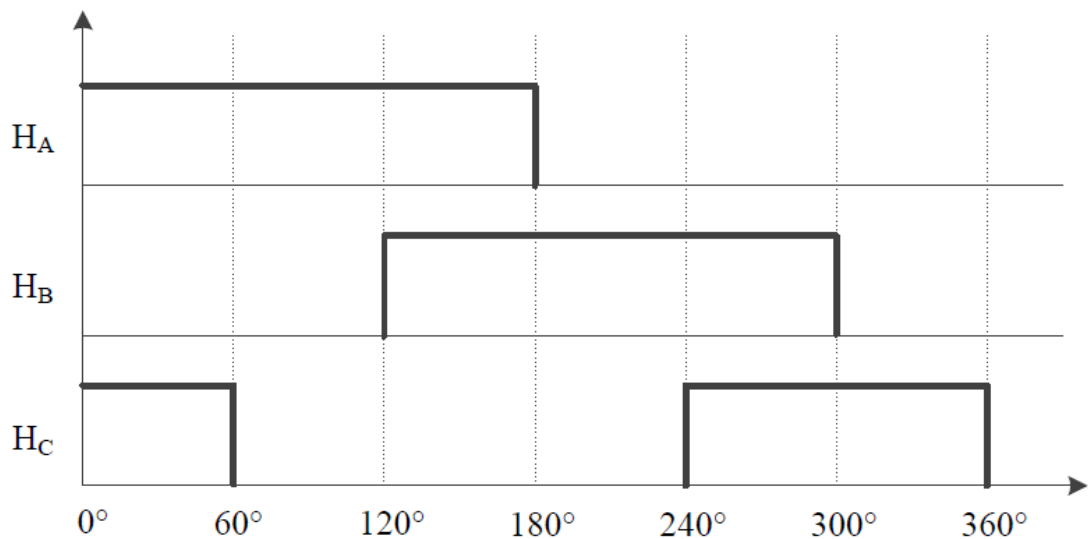


Рис. 2.4. Датчики Холла видають сигнали в циклі 360 електричних градусів

+

Таблиця 2.1

**Стан датчиків Холла та відповідних перемикачів**

Датчики Холла			Перемикачі		Фазні обмотки двигуна Поточний напрям		
H <sub>a</sub>	H <sub>b</sub>	H <sub>c</sub>	Висока сторона	Низька сторона	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	0	1	T1	T4	+	-	ВИКЛ.
1	0	0	T1	T6	+	ВИКЛ.	-
1	1	0	T3	T6	ВИКЛ.	+	
0	1	0	T3	T2	ВИКЛ.	+	
0	1	1	T5	T2	-		+
0	0	1	T5	T4	ВИКЛ.	-	+

## РОЗДІЛ 3

## ОБґРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОТРАКТОРА

## 3.1 Аналіз тягових характеристик і параметрів регулювання електротрактора

Тягова характеристика електротрактора з електроприводом, як і інших мобільних енергетичних засобів, являє собою залежність тягового зусилля ( $F_m$ ), що розвиває електротрактор від швидкості руху ( $v$ ) при сталості приєднаної потужності приводного електродвигуна ( $P_1$ ).

Узагальнена гранична тягова характеристика електрифікованих транспортних засобів представлена на рис. 3.1 [9].

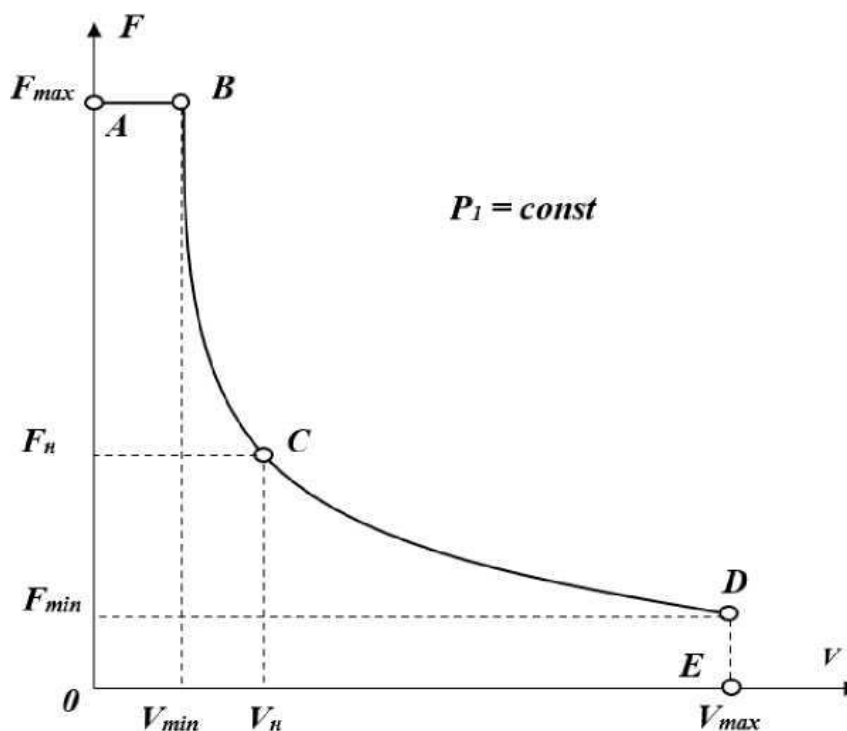


Рис. 3.1. Узагальнена гранична тягова характеристика електротрактора

Основним призначенням тягового електродвигуна в приводі електротрактора є забезпечення формування тягової характеристики з необхідними енергетичними показниками.

З урахуванням можливих режимів роботи тягового електродвигуна на характеристиці виділяється три основних ділянки, відповідних сталості

максимальної сили тяги ( $F_{max}$ ) (лінія АВ), постійності приєднаної потужності ( $P_I$ ) (ділянка ВСD) і незмінності максимальної швидкості ( $V_{max}$ ) (лінія DE). При цьому ділянка, на якій забезпечується режим сталості потужності  $P_I = \text{const}$  має форму гіперболи і містить дві характерні зони: короткочасної роботи в режимі сталості потужності  $P_I$  (лінія ВС) і зони тривалої роботи при  $P_I = \text{const}$  (лінія CD). Точки В і D є граничними, в яких відбувається перехід електротрактора на режими підтримки незмінності потужності (В) і сталості максимальної швидкості (D).

За номінальне значення тягового зусилля  $F$  приймається сила, що забезпечує рух електротрактора з повною розрахунковою масою із заданою номінальною швидкістю  $v_n$ . При цьому діапазони зміни тягових зусиль від  $F_{max}$  до  $F_{min}$  і швидкості руху від  $v_{min}$  до  $v_{max}$  залежить від багатьох факторів: глибини обробітку ґрунту, ширини захвату, величини необхідної сили тяги  $F$  для оранки важких ( $F_m$ ), середніх ( $F_c$ ) і легких ґрунтів ( $F_l$ ), вологості ґрунту та ін.

Електротрактори за умовами навантаження можуть експлуатуватися при потужності  $P < P_{In}$ . Це означає, що разом з граничними тяговими характеристиками при  $P_I = P_{In}$  агрегат буде працювати на часткових тягових характеристиках, розташованих в області  $0ABCDE$  (рис. 3.1). Сімейство часткових тягових характеристик  $P(V)$  представлені на рис. 3.2, а, б, в, де в різних поєднаннях враховується можливість отримання як максимального тягового зусилля, так і максимальної швидкості при споживанні електричної потужності  $P_I < P_{In}$ . Необхідність регулювання тягового зусилля згідно характеристик на рис. 3.2 обумовлена в першу чергу технологічними циклами роботи електротрактора і умовами його експлуатації. Реалізація часткових тягових характеристик різного виду забезпечується відповідним керуванням тяговим електродвигуном [9, 10].

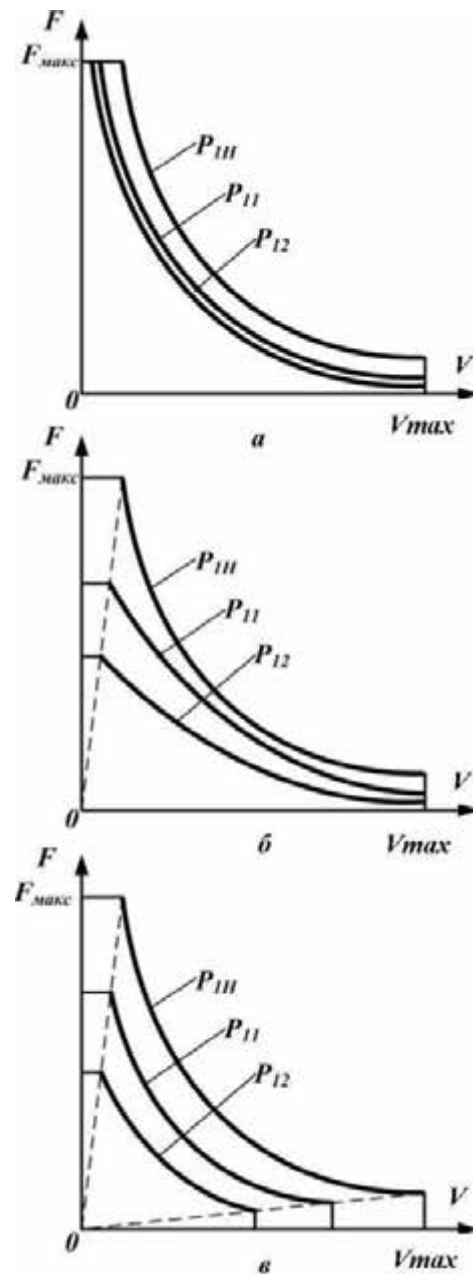


Рис. 3.2. Тягові характеристики електротрактора:  $P_{III} > P_{II} > P_I$

За тяговою характеристикою трактора  $P(V)$  (рис. 2.1) може бути отримана механічна характеристика тягового електродвигуна електротрактора, що представляє собою залежність електромагнітного моменту від кутової швидкості  $M(\omega)$  з використанням таких співвідношень [11]:

$$\omega = \frac{i_p \cdot i_n}{R_k} \cdot V, \quad (3.1)$$

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

де  $F_m$  тягове зусилля, Н;

$V$  - лінійна швидкість руху, м / с;

$R_k$  - радіус кочення колеса електротрактора, м;

$i_p; \eta_p$  - передавальне відношення і ККД редуктора;

$i_n; \eta_n$  - передавальне відношення і ККД ланцюгової передачі (при її наявності в доповненні до редуктора);

$\eta_k$  - ККД колеса.

Побудована таким чином механічна характеристика  $M(\omega)$  тягового електродвигуна електротрактора наведена на рис. 3.3. Відзначимо, що механічна характеристика містить три ділянки: сталості пускового моменту  $M_n = M_{max} = const$  - лінія АВ; сталості споживаної двигуном потужності  $P_1 = const$  - крива ВСD; обмеження швидкості обертання  $\omega_{max} = const$  - лінія DE. Координати точок В ( $M_{max}; \omega_{min}$ ); С ( $M_n; \omega_n$ ) і D ( $M_{min}; \omega_{max}$ ) на механічній характеристиці тягового електродвигуна (ТЕД) однозначно визначають кратність максимальної швидкості  $K_\omega = \omega_{max} / \omega_n$ , кратність максимального моменту  $K_M = M_{max} / M_n$  або перевантажувальну здатність ТЕД і режим номінального навантаження в точці С з координатами  $M_n$  і  $\omega_n$ . На характеристиці  $M(\omega)$  точка В відповідає швидкості  $\omega_{min}$  і виходу двигуна на режим сталості споживаної від джерела потужності  $P_1 = const$ . Коефіцієнти зміни швидкості і моменту  $K_\omega$  і  $K_M$  є найбільш важливими показниками регульовальних і пускових властивостей тягового електродвигуна і самим безпосереднім чином впливають на розрахункову потужність, габаритні розміри двигуна і систему керування.

При цьому

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

тобто коефіцієнти зміни кутової швидкості  $K_\omega$  і частоти обертання  $K_n$  тягового електродвигуна, а також швидкості руху  $K_V$  електротрактора мають рівні значення. Механічні характеристики є законом регулювання тягового двигуна електротрактора. При реалізації граничних залежностей  $F(V)$  і  $M(\omega)$  тяговий електродвигун споживатиме з мережі живлення номінальну приєднану

потужність  $P_{1н}$ . Для практичної реалізації закону регулювання тяговим двигуном, що визначається характеристикою  $M(\omega)$  наведеною на рис 3.3, доцільно використовувати в якості тягового електродвигун, механічні характеристики якого при даному способі керування близькі до гіперболічних залежностей. Розглянута механічна характеристика типова для тягових електродвигунів мобільних транспортних засобів (електричних трансмісій тепловозів, електротракторів, електромобілів [12, 13].

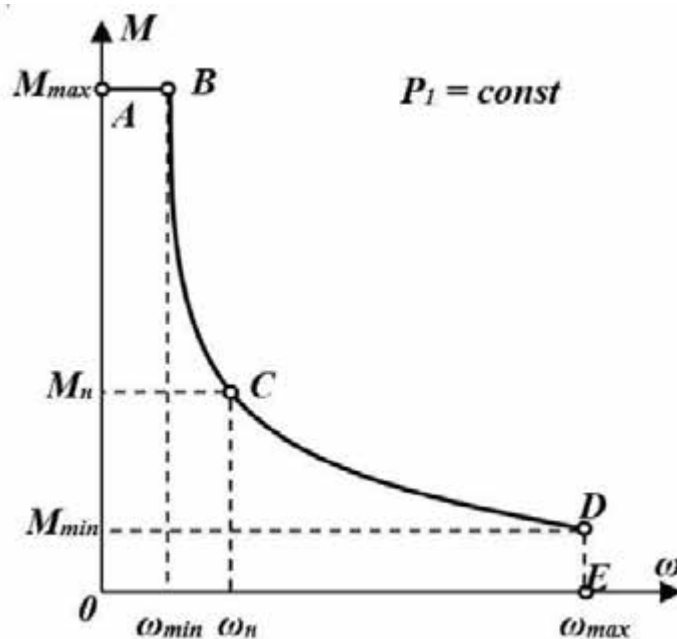


Рис. 3.3. Механічна характеристика тягового електродвигуна електротрактора

Функційні залежності  $U(I)$ , отримані в результаті перетворення характеристики  $M(\omega)$  представленої на рис. 3.3 і рівнянь, що визначають властивості двигуна в усталеному режимі роботи [14]:

$$\begin{aligned} U &= E_a + IR_a; E_a = k\Phi\omega; \\ M &= k\Phi I; \omega = \frac{U - IR_a}{k\Phi}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

де  $E_a$  - ЕРС якоря;

$M$  - електромагнітний момент;

$\Phi$  - магнітний потік;

$R_a$  - опір в колі якоря;

$k$  - конструктивна стала.

При цьому для двигуна постійного струму послідовного збудження

$$R_a = R_{\text{я}} + R_{\text{оп}} + R_{\text{ц}} + R_{\text{зб}}, \quad (3.5)$$

де  $R_{\text{я}}$ ;  $R_{\text{оп}}$ ;  $R_{\text{ц}}$ ;  $R_{\text{зб}}$  - відповідно, опір обмотки якоря, обмотки додаткових полюсів, перехідного щіткового контакту і обмотки послідовного збудження.

Для розрахунків і аналізу тягових характеристик використаємо наступні параметри ТЕД постійного струму в відносних одиницях: потужність споживана

двигуном з мережі  $P_{\text{р}} = P_1 / P_{1\text{н}}$ ; напруга живлення  $U_* = U / U_{\text{н}}$ ; струм якоря

$I_{\text{а}*} = I_{\text{а}} / I_{\text{н}}$ ; електрорушійна сила  $E_* = E / U_{\text{н}}$ ; кутова швидкість  $\omega_* = \omega / \omega_{\text{н}}$ ;

частота обертання  $n_* = n / n_{\text{н}}$ ; електромагнітний момент  $M_* = M / M_{\text{н}}$ ;

корисна потужність на валу  $P_{2*} = P_2 / P_{2\text{н}}$ ; коефіцієнт корисної дії

$\eta = P_2 / P_1 = P_{2*} / P_{\text{р}*}$ , магніторушійна сила збудження  $F_{\text{зб}*} = F_{\text{зб}} / F_{\text{зб.н}}$ ; струм

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

збудження,  $\beta = I_{\text{зб}} / I_{\text{а}} = I_{\text{зб}*} / I_{\text{а}*}$ ; магнітний потік  $\Phi_* = \Phi / \Phi_{\text{н}}$ , а також

наступними співвідношеннями

$$I_{\text{max}*} = I_{\text{max}} / I_{\text{н}} = K_{\text{м}} \Phi_*; \quad (3.6)$$

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

$$P_{\text{р}*} = U_* \cdot I_* = P_1 / P_{1\text{н}}, \text{ звідки } I_* = I_{\text{н}} / U_* \quad (3.8)$$

$$P_{\text{розр}} = P_{\text{н}} \cdot K_{\omega} \approx M_{\text{н}} \cdot \omega_{\text{max}}. \quad (3.9)$$

Рівняння (3.4 ... 3.6) дозволяють також визначити параметри тягового двигуна постійного струму в вузлових точках тягової характеристики  $M(\omega)$ , наведеної на рис. 3.3. Вважаємо, що в якості номінальних значень прийняті напруга  $U = U_{\text{н}}$  і струм  $I = I_{\text{н}}$ , для режимів роботи ТЕД, відповідних точкам В і D, отримаємо

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

Так як згідно (3.4) в 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 підстановки значень коефіцієнтів  $K$  до системи 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  $\Delta U_n$  - спад напруги в колі якоря при  $I = I_n$ .

Розв'язавши (3.12) та (3.13) щодо параметрів регулювання  $K_M$  і  $K_\omega$ , можна оцінити прийнятні способи керування ДПС для реалізації закону регулювання  $M(\omega)$  і, отже, тягової характеристики  $F(V)$ .

За (3.12) та (3.13), регулювання кутової швидкості  $\omega$  ДПС раціонально здійснювати за рахунок зміни напруги на колекторі  $U$  і магнітного потоку  $\Phi$ .

Основними експлуатаційними показниками електротрактора, що впливають на вибір тягового двигуна, є його повна маса  $G$ , число ведучих коліс  $m_k$ , номінальна сила тяги  $F_n$  і швидкість номінального режиму  $u$ , що визначають приєднану потужність  $P_l$  тягового двигуна, максимальна сила тяги  $F_{max}$  і швидкість  $V_{max}$ . Зазначені показники встановлюються на початковому етапі розробки електротрактора за результатами аналізу заданих технологічних циклів роботи і умов експлуатації. Показник  $F_n$  зумовлює вибір номінальної потужності ТЕД і можливість його тривалої роботи за умовами нагріву, тому в якості номінального для ТЕД раціонально приймати тривалий режим [57-59].

Вимоги до ТЕД формуються з урахуванням параметрів граничної тягової характеристики  $F(V)$  (рис. 3.1). Сумарну силу тяги  $F$  для сталої швидкості руху мотоблока можна визначити за співвідношенням [15,16]:

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

де  $G$  - експлуатаційна вага трактора, кН;

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

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

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

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

Гранична залежність  $P(V)$  електротрактора може бути побудована за рівнянням

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

де  $P_{In}$  - потужність споживана з мережі при номінальному навантаженні;

$\eta_{\Sigma}$  - сумарний ККД приводу;

При цьому

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{en}\eta_{\omega}\eta_{p}\eta_{k}, \quad (3.16)$$

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

$\eta_{\omega}$  - ККД тягового електродвигуна;

$\eta_{p}$  - ККД редуктора;

$\eta_{k}$  - ККД коліс.

Для побудови граничної тягової характеристики необхідні значення кратності максимальної швидкості  $K_V$  і перевантажувальної здатності  $K_F$ . Коефіцієнт  $K_F$ , як правило, задається в межах  $K_F = 2,5 \dots 3,0$ , а значення  $K_V = K_n = n_{max} / n_n$  забезпечується вибором ТЕД з відповідною кратністю максимальної частоти обертання  $n_{max}/n_n$ , яка зазначається в каталозі електрообладнання. У разі рівного розподілу  $K_{\omega} = K_V$  і  $K_M = K_F$ , передавальне число редуктора дорівнює

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

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

$$P_n = F_n V_n / \eta_p \eta_k. \quad (3.18)$$

Таким чином, експлуатаційні показники електротрактора, а також його тягова характеристика  $F(V)$  і механічна характеристика  $M(o)$  тягового двигуна дозволяють визначити параметри регулювання  $K_\omega$ ,  $K_M$ ,  $U_{\max}^*$ ,  $I_{\max}^*$ ,  $\Phi^*$ , розрахункову  $P_p$  і номінальну  $P_n$  потужності, які впливають на енергетичні та техніко-економічні показники, а також на вибір конструктивного виконання, номінальних даних і параметрів тягового електродвигуна.

Зразковий вид графіка ККД ТЕД представлений на рис. 3.4.

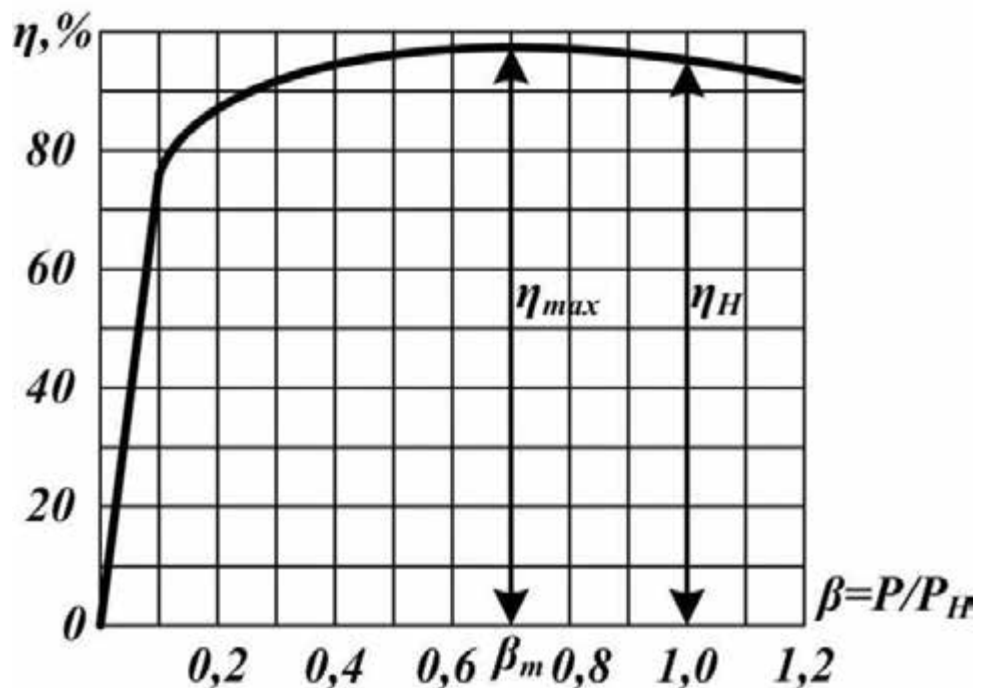


Рис. 3.4. Графік ККД тягового електродвигуна мотоблока

Змінюючи співвідношення втрат  $\Delta P_c$  і  $\Delta P_v$ , можна забезпечити максимальне значення ККД при різних навантаженнях. Якщо за призначенням ТЕД працює здебільшого при навантаженнях близьких до номінального, тоді економічно обґрунтовано те, щоб значення  $\beta_m$  було близько до одиниці. Якщо двигун призначений для роботи в основному при недовантаженні, то в цьому випадку

доцільно, щоб значення  $\beta_m$  було менше одиниці. Зазвичай ТЕД мають  $\beta_m = 0,8 \dots 0,85$  [17].

### 3.2 Розрахунок потужності і вибір тягового електродвигуна електротрактора

Вибір електродвигуна для приводу електроактора є однією з найбільш складних і відповідальних завдань в процесі створення тягового електропривода тракторів, особливо на початковому етапі розробки. Вибраний двигун повинен забезпечувати заданий технологічний режим робочого органу трактора з високими енергетичними показниками, відповідати компонованню елементів конструкції трактора і умовам навколишнього середовища при нормативному нагріванні.

Вибір серійних електродвигунів виконується з урахуванням таких показників:

- 1) род струму;
- 2) напруга живлення;
- 3) потужність;
- 4) значення номінальної швидкості і допустимого діапазону зміни швидкостей;
- 5) конструктивне і кліматичне виконання;
- 6) енергетичні показники (ККД);
- 7) габарити і маса.

Крім того на вибір параметрів тягового електродвигуна впливають експлуатаційні показники електротрактора, до яких відносяться: повна маса ( $G$ ); радіус ведучого колеса ( $R_k$ ); тривала або номінальна сила тяги ( $F_H$ ) і швидкість руху при тривалому режимі ( $V_H$ ), що визначає ефективну потужність ( $P_E$ ) ТЕД; максимальна сила тяги ( $F_{max}$ ) і швидкість руху ( $V_{max}$ ), що встановлюються на початковому етапі розробки електропривода трактора за результатами аналізу найбільш енергоємного енергетичного процесу - оранки ґрунту.

Вибір ТЕД проводиться в такій послідовності:

- 1) розрахунок потужності і попередній вибір двигуна;
- 2) перевірка двигуна за умовами пуску і перевантажувальної здатності;
- 3) перевірка вибраного двигуна за умовами нагрівання.

Відзначимо також, що вибір потужності, кутової швидкості, основних розмірів ТЕД і передавального числа редуктора не є однозначним. Будучи взаємозалежними параметрами вони можуть бути знайдені як рішення деякої оптимізаційної задачі при обов'язковому дотриманні досить суперечливих вимог. По-перше, значення цих параметрів ТЕД і механічної передачі повинні задовольняти заданим експлуатаційним показниками електротрактора, особливостям конструювання його конструктивних елементів. По-друге, повинні прийматися до уваги способи керування тяговим електродвигуном, що забезпечують в заданому робочому діапазоні кутової швидкості і навантаження високі енергетичні показники електропривода.

### 3.2.1 Вибір тягового електродвигуна за родом струму

Для практичної реалізації характеристики  $M(\omega)$  для електропривода електротрактора можуть бути використані як електродвигуни змінного струму, так і двигуни постійного струму з керованими вентильними перетворювачами. Однак використання ДПС послідовного збудження має ряд переваг:

- 1) Механічні характеристики ДПС послідовного збудження  $M(\omega)$  природна і штучні при будь-якому способі регулювання швидкості наближені до гіперболи, тобто при зміні моменту опору навантаження кутова швидкість  $\omega$  змінюється автоматично, забезпечуючи потужність  $P_1 = const$ , що відповідає закону регулювання ТЕД трактора (рис. 3.3). При цьому для керування ДПС при живленні від централізованої мережі змінного струму може бути використаний керований напівпровідниковий випрямляч, що має малі габарити і вартість. Для реалізації цього ж закону регулювання в разі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, виникає необхідність використання трифазного перетворювача частоти, що дорівнює вартості електродвигуна [55].

2) Електродвигуни постійного струму, на відміну від асинхронних електродвигунів, забезпечують регулювання швидкості в широкому діапазоні як вниз від номінальної, так і вгору від номінальної при використанні простих технічних засобів. При цьому коефіцієнт зміни максимально швидкості характеризує регульовальні властивості двигуна  $k_{\omega} = \omega_{max} / \omega_n = 2...4$ . Для досягнення швидкості вище номінальної у асинхронних електродвигунів необхідно підвищувати напругу живлення в 2...2,5 рази вище номінальної, що обумовлює інтенсивний нагрів двигуна і перетворювача, значне збільшення втрат і зниження ККД [18].

За пусковим властивостям і перевантажувальній здатності ДПС також мають перевагу перед асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Про це свідчать порівняльні дані:

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

Тому при зміні моменту навантаження в широких межах, потужність  $P_2$  і струм  $I_a$  в двигуні послідовного збудження змінюється пропорційно  $\sqrt{M}$ . Це означає, що при одному і тому ж моменті навантаження на валу, ДПС послідовного збудження можуть мати меншу встановлену потужність в порівнянні з іншими електродвигунами. [18].

3) У ДПС послідовного збудження електромагнітний момент має квадратичну залежність від струму якоря  $I_a$ , А значить і від струму навантаження  $I$

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

З цієї причини дані двигуни застосовуються в приводах установок, де необхідні великі пускові моменти і спостерігаються часті перевантаження по

моменту. Згідно механічної характеристики (рис. 3.3) кутова швидкість двигуна

$$\omega \sim 1/\sqrt{M}; \text{ в наслідок чого корисна потужність } P_2 = M\omega = C\sqrt{M}.$$

Поряд з перевагами тягових електродвигунів постійного струму є також істотні недоліки: порівняно великі габарити і маса, а також наявність щітково-колекторного вузла.

### 3.2.2 Розрахунок потужності і вибір тягового електродвигуна

Загальноприйнята методика визначення розрахункової потужності приводного електродвигуна з використанням навантажувальних діаграм  $P(t)$  і  $M(t)$  робочих машин не прийнятна для вибору ТЕД електротрактора, оскільки навантажувальні діаграми електротракторів з ТЕД не набули поширення. Тому запропонована методика розрахунку потужності і вибору тягового електродвигуна електротрактора заснована на використанні значень тягових зусиль  $F$ , необхідних для виконання трактором основних технологічних процесів.

Потужність ТЕД визначимо з умови забезпечення необхідного тягового зусилля електротрактора при виконанні найбільш енергоємної технологічної операції - оранки ґрунту. При цьому

$$F = K \cdot a \cdot b, \tag{3.19}$$

де  $a, b$  - відповідно глибина оранки і ширина захвату плуга, м;

$K$  - питомий опір ґрунту, кПа.

Відповідно до системних досліджень, наведених у [64], визначено три категорії ґрунтів: важкі ( $F_B$ ), середні ( $F_C$ ) і легкі ( $F_L$ ), питомі опори яких відповідно рівні  $K_B = 90$  кПа;  $K_C = 60$  кПа;  $K_L = 30$  кПа.

У приватних присадибних господарствах і спорудах закритого ґрунту в основному використовують плуги ПЛ-20 та ПЦ-1-18 з характеристикою плужних корпусів  $b/a = 1,2 \dots 1,5$ . Оранка ґрунту проводиться на глибину  $a=10, 15, 18$  і  $20$  см. Як правило, використовуються плуги з шириною захвату  $b=18$  см, тоді приймаючи глибину підкопу пласта  $a=20$  см, за (3.18) визначимо значення

тягових зусиль для оранки різних за характером ґрунтів:  $F_B = 2,43 \text{ кН}$ ;  $F_C = 1,62 \text{ кН}$ ;  $F_L = 0,81 \text{ кН}$ .

Для реалізації тягових зусиль необхідно, щоб при оранці ґрунту зчіпна вага  $G = mg$  трактора масою  $m$ , була певної величини в залежності від характеристики ґрунту.

При цьому [17]

$$G = F \cdot (\lambda \cdot \varphi_c - \xi \cdot f), \quad (3.20)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт навантаження коліс мотоблока;

$\varphi_c$  - коефіцієнт зчеплення коліс з ґрунтом;

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

$f$  - коефіцієнт опору перекачування коліс.

Для тракторів з шинами  $\lambda = 1$ ;  $\varphi_c = 0,5 \dots 0,7$ ;  $\xi = 1$  і  $f = 0,1 \dots 0,12$ , а зчіпний вага  $G_B = 4,05 \text{ кН}$ ;  $G_C = 2,7 \text{ кН}$  і  $G_L = 1,35 \text{ кН}$ . Для тракторів з металевими колесами, що мають шипи

$$G_B = 2,7 \text{ кН}; G_C = 1,8 \text{ кН} \text{ і } G_L = 0,9 \text{ кН}, \quad (3.21)$$

тобто при використанні металевих коліс потрібна менша зчіпна вага трактора  $G$ .

Корисна потужність тягового електродвигуна електротрактора визначається за рівнянням [17]

$$P = \frac{(F + fG)V}{\eta_p \cdot \eta_b \cdot \eta_k}, \quad (3.22)$$

де  $F$  - тягове зусилля, приймається при розрахунку потужності в залежності від характеристики ґрунту, кН;

$G$  - зчіпна вага, кН;

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

$\eta_p$  - ККД редуктора;

$\eta_{\delta} = 0,93$  - коефіцієнт, що враховує втрати на буксування;

$\eta_{\kappa} = 0,95$  - коефіцієнт, що враховує втрати на подолання кочення коліс.

Величина  $\eta_T = \eta_p \cdot \eta_{\delta} \cdot \eta_{\kappa}$  отримала назву тягового ККД електротрактора. У попередніх розрахунках приймається  $\eta_T = 0,74 \dots 0,76$ . Для більш точного розрахунку потужності за рівнянням (3.22) необхідно визначити тяговий ККД з урахуванням реальної компоновки механічної передачі трактора: типу редуктора, можливості використання додаткової ланцюгової передачі тощо. Швидкість руху трактора  $V$  при підстановці в рівняння (3.22), приймається відповідно з доцільним діапазоном швидкостей, встановлених на підставі досліджень і спостережень за роботою мобільних агрегатів, керованих операторами чоловічої і жіночої статі:  $V = 0,3; 0,6; 0,9; 1,2$  м/с або  $V = 1,08; 2,16; 3,24; 4,32$  км/год. [64]. На рис. 3.5 представлені графіки корисної потужності  $P(V)$  при  $K = const$  тягових двигунів електротракторів за результатами розрахунків за рівнянням (3.22) при  $\eta_m = 0,75$ ; для легких, середніх ґрунтів і важких ґрунтів.

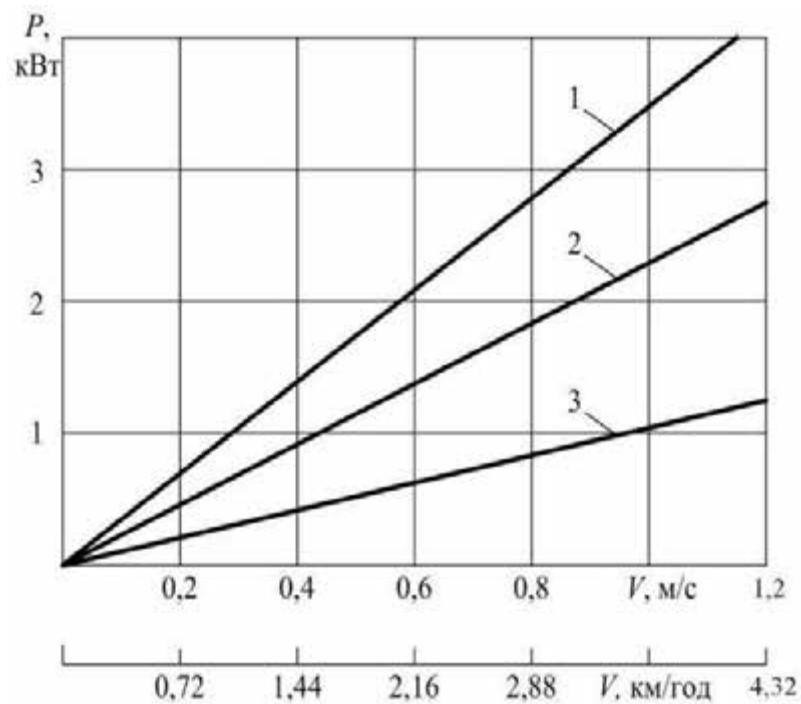


Рис. 3.5. Графіки потужності тягового електродвигуна електротрактора при оранці ґрунтів: 1 - важких, 2 - середніх, 3 – легких

Графіки потужностей (рис. 3.5) можуть бути використані на практиці для визначення розрахункової потужності тягових електродвигунів в приводі тракторів, призначених для обробки ґрунтів з різними характеристиками за питомим опором  $K$ .

Далі за величиною розрахункової потужності  $P$  за довідником або каталогу електрообладнання вибирається електродвигун з найближчою номінальною потужністю  $P_n$  і, по можливості, найбільшою номінальною частотою обертання  $n_n$ , що має найбільш високий ККД і найменші габарити, але з обов'язковим виконанням умов по кратності максимальної швидкості  $K_\omega = \omega_{max} / \omega_n = n_{max} / n_n = 2,0 \dots 2,25$ , де  $n_{max}$  також наводиться в каталогах. Крім того, двигун вибирається за ступенем захисту не нижче IP44, кліматичним виконанням і категорією розміщення У2. Важливим параметром при виборі двигуна крім ККД є показник якості машини, визначається відносною масою електродвигуна, кг/кВт.

$$q = G_d / P_n, \quad (3.23)$$

де  $G_d$  - маса електродвигуна, кг.

### 3.2.3 Вибір передавального відношення редуктора

Передавальне відношення редуктора в приводі електротрактора можна визначити за співвідношенням (3.2) для максимальних значень кутової швидкості двигуна  $\omega_{max}$  і швидкості руху агрегату  $V_{max}$

$$i_p = \frac{\omega_{max} \cdot R_k}{V_{max}}, \quad (3.24)$$

При проведенні системних випробувань металевих і гумових коліс електротракторів з ДВЗ і ТЕД [19], обґрунтовані раціональні конструкції ведучих коліс з оптимальним діаметром  $D_k = 520 \text{ мм}$ . Максимальна швидкість серійних двигунів загальнопромислового призначення становить  $n_{max} = 4000 \text{ об / мин}$ , Тобто  $\omega_{max} = 418,7 \text{ рад / с}$ . У [19] також встановлено робочий діапазон

швидкостей мотоблоків при оранці ґрунту (2.51). Приймавши для розрахунку  $i_p$ ,  $V_{max} = 1,2$  м/с, отримаємо

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

Редуктори з передавальним відношенням такого порядку мають великі габарити і масу, що обмежує їх застосування в електротракторах. Тому механічну передачу в електротракторах доцільно виконувати з використанням редукторів з передавальним відношенням  $i_p \leq 40$  і ланцюговою передачею з  $i_l = 2 \dots 3$ . У цьому випадку передавальне відношення механічної передачі визначається

$$i_{МП} = i_p \cdot i_l. \quad (3.25)$$

Відзначимо, що застосування додатково до редуктора ланцюгової передачі істотно спрощує конструктивну компоновку механічної передачі електротрактора.

### 3.2.4 Перевірка тягового електродвигуна привода електротрактора

*Перевірка тягового електродвигуна за умовами пуску.* Для надійного пуску приводного двигуна електротрактора вимагається, щоб величина пускового моменту двигуна  $M_{II}$  була достатньою для подолання початкового статичного моменту зрушення електротрактора і приведення в рух робочого органу.

Перевірка ТЕД за умовами пуску проводиться за умовою [20]:

$$M_{II} = M_{max} = M_H \cdot K_M \cdot K_U^2 \geq 1,25 \frac{M_{зр.}}{i_{МП} \cdot \eta_{МП}}, \quad (3.26)$$

де  $K_M$  - кратність максимального моменту двигуна;

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

1,25 – коефіцієнт, що враховує кратність надлишкового моменту, необхідного для розгону махових мас приводу;

$M_{зр}$  - статичний момент зрушення трактора з робочим органом. Для трактора з заглибленим плугом приймається  $M_{зр} = 1,5...2,0 M_H$ .

При використанні в якості ТЕД електротрактора ДПС, у якого  $M_n = M_{max}$ , умова (3.26) виконується.

*Перевірка ТЕД за умовами перевантаження.* Перевірка перевантажувальної здатності ТЕД електротрактора проводиться за умовою [20]:

$$M_{max} = M_{II} \cdot K_M \cdot K_{II}^2 \geq (1,2...1,3) M_{C_{max}}, \quad (3.27)$$

де  $M_{C_{max}}$  – максимальне значення статичного моменту опору ґрунту;

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

*Перевірка ТЕД за умовами нагрівання.* Втрати енергії в елементах електропривода пов'язані з виділенням теплоти і їх нагріванням.

Практично всі елементи силового каналу електропривода електротрактора критичні до температурного режиму. Теплота, що виділяється в ТЕД, підвищує температуру ізоляції, а отже і інтенсивність її старіння. У загальному випадку, якщо режим тепловиділення в двигуні обумовлює нагрівання ізоляції і термін її служби менше заданого, то такий режим за умовами нагрівання є допустимим. У цьому випадку теплові втрати потужності  $\Delta P_T$  постійні і після перехідного періоду нагрівання елементів каналу встановлюється постійна температура  $\theta_s$ , що дорівнює

$$\theta_s = \theta_{н.с.} + \tau, \quad (3.28)$$

де  $\theta_{н.с.}$  - температура навколишнього середовища;

$\tau$  - перевищення температури елемента, що розглядається над температурою навколишнього середовища.

Величина  $m$  пропорційна потужності теплових втрат  $\Delta P_T$  і обернено пропорційна тепловіддачі  $A$ , Вт/°С

$$\tau = \Delta P_T / A. \quad (3.29)$$

При  $\theta = const$  зв'язок між робочою температурою і темпом зносу ізоляції характеризується графіками терміну служби ізоляції  $T(\theta)$ , наведеними на рис. 3.6. При цьому зручно ввести і використовувати в подальшому характеристику швидкості зносу ізоляції при даній температурі  $d(\theta) = T(\theta)$ .

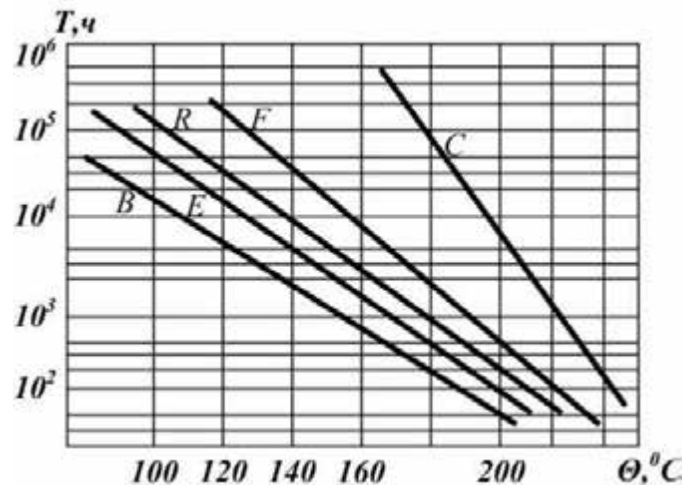


Рис. 3.6. Залежності терміну служби різних класів ізоляції від робочої температури

Характер такої залежності (рис. 3.7) для класів ізоляції В і F свідчить, що темп старіння ізоляції залежить від робочої температури. Так для класу ізоляції А при збільшенні температури на 8...10 °С вище номінальної, темп старіння ізоляції зростає приблизно вдвічі

$$d(\theta + 10^\circ C) \cong 2d(\theta_n). \quad (3.30)$$

Для статичного температурного режиму рівняння (3.58) з урахуванням (3.59) набуде вигляду

$$\theta = \theta_{o.c.} + \tau = \theta_{o.c.} + \Delta P_T / A = const. \quad (3.31)$$

Для електропривода електротрактора характерним є режим роботи при  $\Delta P_T = var$ , тому для оцінки умов нагріву ізоляції і швидкості її старіння при  $\theta(t) = var$

не більше номінальної, тобто  $d[\theta(t)] \leq d_n$ .

Умова допустимості режиму виділення втрат за критерієм терміну служби ізоляції можна представити у вигляді наближеної нерівності [21]:

$$d_n \geq d_{cp} = d \left( \theta_{o.c.} + \frac{\Delta P_{cp}}{A} \right). \quad (3.32)$$

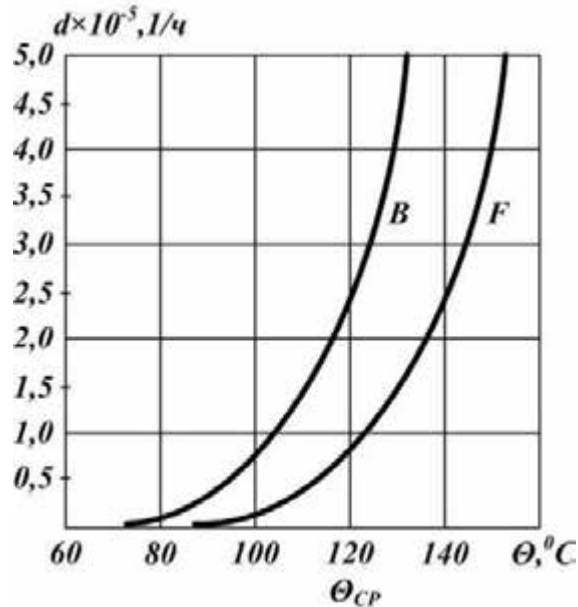


Рис. 3.7. Залежність швидкості старіння ізоляції від температури

Якщо (3.32) розглядати у формі рівності, то це буде умова повного завантаження двигуна за умовами нагрівання. Крім того співвідношення (3.32) означає, що режим виділення втрат для якого виконується рівність, є еквівалентним номінального режиму для якого розраховується ТЕД за критерієм терміну його служби.

Співвідношення (3.32) є основою для оцінки можливих ситуацій, пов'язаних з обмеженнями на режими перетворення енергії. Ці обмеження враховуються при виборі ТЕД і його перевірці за умовами нагріву, а також при перевірці еквівалентності за впливом на строк служби ізоляції двох режимів з різним характером втрат і тепловиділення. З (3.32) випливає, що ці два режими будуть еквівалентні, якщо певні для кожного з них швидкості старіння ізоляції дорівнюватимуть.

### 3.3 Теоретичні дослідження характеристик регулювання тягового електродвигуна

Характеристики регулювання являють собою статичні функціональні залежності  $U_*(\omega_*)$ ,  $\Phi_*(\omega_*)$  або  $U_*(I_*)$ ,  $\Phi_*(I_*)$  при  $P_{1*} = const$ , на основі яких здійснюється керування ТЕД із забезпеченням реалізації граничних і часткових механічних характеристик  $M_*(\omega_*)$  на всіх інтервалах зміни кутової швидкості  $\omega_*$ . Основна вимога до формування і вибору характеристик регулювання полягає в найбільш повному задоволенні таких критеріїв раціонального керування тяговим двигуном:

- забезпечення при регулюванні високих значень ККД ТЕД і підтримання сталості споживаної потужності  $P_{1*} = 1$ ;
- реалізація заданих значень максимальної швидкості  $\omega_{max*}$  і максимального моменту  $M_{max*}$  при найменшому значенні напруги  $U_*$  і мінімально допустимому значенні магнітного потоку  $\Phi_{min*}$ ;
- отримання характеристик регулювання  $U_*(\omega_*)$ ,  $\Phi_*(\omega_*)$  або  $U_*(I_*)$ ,  $\Phi_*(I_*)$ .

Характеристики регулювання ТЕД можуть бути граничними і частковими. Під граничними характеристиками розуміють характеристики регулювання ТЕД, що забезпечують в робочому діапазоні навантажень і швидкостей  $\omega_*$  реалізацію сталості споживаної потужності ( $P_{1*}=1$ ). Часткові характеристики регулювання формуються для реалізації навантажень менше номінальних при  $P_{1*}^i < P_{1*} = 1$ .

Умови регулювання ТЕД визначаються вимогами тягової механічної характеристики  $M_*(\omega_*)$  на всіх інтервалах зміни кутової швидкості: підтримання  $P_{1*}=1$ , забезпечення значення пускового моменту  $M_{п*}$  і пускового струму  $I_* = I_{max*}$  і т.і.

При цьому гранична механічна характеристика  $M_*(\omega_*)$ , яка визначає закон

регулювання ТВД має три основних ділянки (рис. 3.8):

$AB$  – сталості пускового моменту  $M^* = M_{max}^* = M_{п}^*$ ;

$BD$  - сталості споживаної потужності  $P_{I^*} = 1$ ;

$DE$  - обмеження кутової швидкості  $\omega^* < \omega_{max}^*$ .

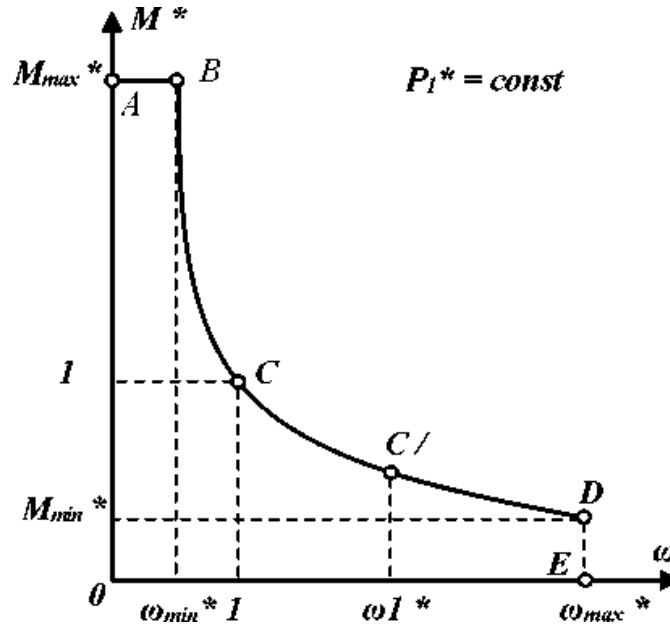


Рис. 3.8. Механічна характеристика  $M^*(\omega^*)$  тягового електродвигуна

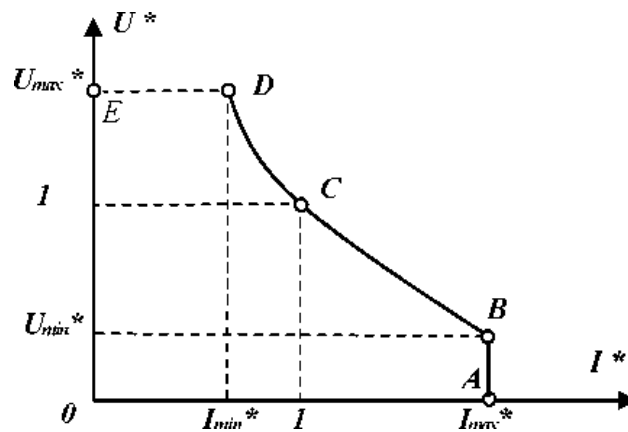


Рис. 3.9. Залежність  $U^*(I^*)$  тягового електродвигуна

Характеристики регулювання напруги  $U^*(I^*)$  або  $U^*(\omega^*)$  можуть бути отримані на підставі рівнянь (3.12) і (3.13) рівноваги напруг в точках В і D граничної механічної характеристики  $M^*(\omega^*)$ , раніше отриманої і розглянутої в п. 3.1, наведені на рис. 3.10. Розділивши зліва і справа рівняння (3.12) і (3.13) на номінальну напругу, отримаємо

$$U_{min*} = a\Phi_{B*} \cdot \omega_{B*} + \epsilon \frac{K_M}{\Phi_{B*}}; \quad (3.33)$$

$$U_{max*} = aK_{\omega} \cdot \Phi_{D*} + \epsilon \frac{M_{min}}{\Phi_{D*}}, \quad (3.34)$$

де  $a = E_H / U_H$ ;  $\epsilon = \Delta U_H / U_H$ . Зазвичай  $a = 0,95$ ;  $\epsilon = I_H R_a / U_H = 0,05$ .

З урахуванням (3.6), (3.7) і (3.3) отримаємо

$$U_{min*} = a\Phi_{B*} \cdot \omega_{min*} + \epsilon I_{max*}; \quad (3.35)$$

$$U_{max*} = a\Phi_{D*} \cdot \omega_{max*} + \epsilon I_{min*} \quad (3.36)$$

Для загального випадку характеристика регулювання  $U_*(\omega_*)$  має вигляд

$$U_* = a\Phi_* \cdot \omega_* + \epsilon I_* \quad (3.37)$$

Характеристику регулювання потоку  $\Phi_*(\omega_*)$  отримаємо з рівняння (3.37) з урахуванням того, що за (3.8)  $I_* = I / U_*$  і вирішивши його відносно потоку  $\Phi_*$

$$\Phi_* = \frac{U_*^2 - \epsilon}{a\omega_* \cdot U_*}. \quad (3.38)$$

Характеристики регулювання потоку в функції струму  $I_*$  будуть мати вигляд

$$\Phi_* = \Phi_*(I_*); \quad \Phi_* = \Phi_*(V_{оп} \cdot I_*). \quad (3.39)$$

Відмінною особливістю регулювання магнітного потоку ТЕД є та обставина, що у таких двигунів струм збудження  $I_{зб} = I_a$ , який визначиться співвідношенням

$$I_{зб} = I_a R_{III} / (R_{зб} + R_{III}) = V_{оп} \cdot I_a \quad (3.40)$$

де  $R_{III}$ ;  $R_{зб}$  – опір шунтуючого реостата і послідовної обмотки збудження;

$V_{оп}$  - коефіцієнт ослаблення поля.

При цьому

$$V_{оп} = I_{зб} / I_a = R_{III} / (R_{зб} + R_{III}) \quad (3.41)$$

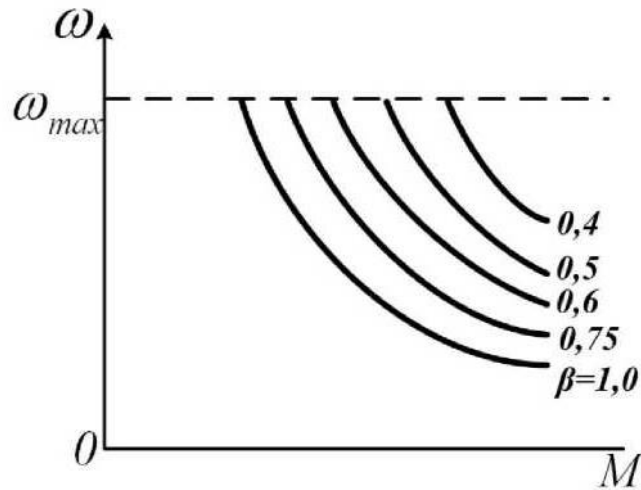


Рис. 3.10. Регулювання швидкості ТЕД зміною магнітного потоку  
(характеристика  $\omega(M)$ )

Спосіб регулювання швидкості зміною магнітного потоку простий і економічний, тому широко застосовується на практиці. Однак він застосовується при регулюванні кутової швидкості в порівняно невеликому діапазоні  $\omega_{max}/\omega_{min}=2\dots3$ . Нижня межа, як зазначалося, обмежується насиченням магнітного кола машини, яка не дозволяє значно збільшувати магнітним потік. Верхня межа  $\omega_{max}$  визначається умовами стійкості (при сильному зменшенні  $I_{3\phi}$  двигун йде в рознос), а також обмеженнями за умовами комутації [22]. У двигуні з послідовним збудженням таке обмеження забезпечується автоматично, якщо зафіксувати максимально допустимий ступінь ослаблення струму збудження за рахунок мінімального значення опору  $R_{ш}$ , при якому  $V_{оп} = 0,4$  (рис. 3.10). Оцінимо можливість формування характеристик регулювання  $U^*(\omega^*)$  і  $\Phi^*(I^*)$ , що забезпечують раціональне регулювання ТЕД у приводі електротрактора відповідно до першого критерію раціонального регулювання, що передбачає отримання максимального ККД двигуна.

Відомий загальний закон оптимального регулювання електричних машин у сенсі забезпечення мінімальних втрат і максимального електромагнітного ККД [23], згідно якого параметри регулювання  $U^*$  і  $\Phi^*$  повинні бути пов'язані з моментом  $M$  такими співвідношеннями

$$U_* = \sqrt{M_*}; \quad (3.42)$$

$$\Phi_* = E_* / \omega_* = \sqrt{M_*}. \quad (3.43)$$

Розглянемо, наскільки раціональним є регулювання частоти обертання потоком  $\Phi_*$  за (3.43) для ТЕД на основних ділянках граничної механічної характеристики  $M_*(\omega_*)$  (рис. 3.9). На ділянці ABC в інтервалі зміни кутової швидкості  $0 \leq \omega_* \leq 1$  при  $\omega_* < 1$ , момент  $M_* > 1$ . Максимальний пусковий момент ТЕД дорівнює  $M_{\Pi max*} = 2...3$ , при цьому з метою обмеження величини пускового струму до значення  $I_{\Pi*} = 2...3$ , істотно знижується напруга  $U_{\Pi min*} \ll 1$  (рис. 2.10), і одночасно, проводиться форсування магнітного потоку  $\Phi_{\Pi max*}$ . Однак величина  $\Phi_{\Pi max*}$  обмежується в основному ступенем насичення магнітного кола ДПС і зазвичай не перевищує значення  $\Phi_{\Pi max*} = 1,2... 1,3$ . Отже, регулювання потоком за (3.44) у даному інтервалі кутових швидкостей неприйнятно.

Оцінимо можливість регулювання потоком за (3.43) на ділянці CD характеристики  $M_*(\omega_*)$  з інтервалом зміни кутової швидкості  $1 < \omega_* < \omega_{max*}$ . Для цього визначимо залежність між ЕРС  $E_*$  і швидкістю  $\omega_*$ . З цією метою помножимо зліва і справа співвідношення (2.43) на  $\sqrt{\omega_*}$ . У результаті отримаємо

$$E_* / \sqrt{\omega_*} = \sqrt{M_* \cdot \omega_*} = \sqrt{P_{EM*}}. \quad (3.44)$$

де  $P_{EM*}$  - електромагнітна потужність ДПС.

Отримання максимальної швидкості  $\omega_{max*}$  на ділянці CD забезпечується ослабленням потоку при підтримці сталості напруги  $U_{max*}$ . При надмірно глибокому ослабленні магнітного поля двигуна максимальна напруга між суміжними колекторними пластинами  $U_{kmax*}$  і реактивна ЕРС  $e_p$  можуть перевищити допустимі значення. Тому мінімальне значення потоку  $\Phi_{D.min*} = 0,3...0,4$ .

У першому наближенні (нехтуючи втратами в колі якоря  $\Delta P_{a*} = 0$ ), можна прийняти потужності  $P_{EM*} = P_{I*} = const$ . Тоді для граничної характеристики регулювання, де забезпечується  $P_{I*} = 1$ , рівняння (3.42) і (3.43) приймуть вид

$$\Phi_* = 1 / \sqrt{\omega_*}; \quad (3.45)$$

$$U_{max*} \cong E_{max*} = \sqrt{\omega_*}. \quad (3.46)$$

З рівняння (3.87) випливає, що зі збільшенням  $\omega_* > 1$ , необхідно збільшувати напругу  $U_* = U_{max*}$  і знижувати коефіцієнт  $B_{OP} = 0,3 \dots 0,4$ . Оцінка раціональності регулювання  $\Phi_*$  і  $U_*$  на ділянці характеристик  $\omega_* > 1$  спрощується, якщо діапазон  $\omega_* > 1$  розбити на наступні інтервали:

$$1 \leq \omega_* \leq \omega_{1*} \text{ і } \omega_{1*} \leq \omega_* \leq \omega_{max*},$$

де  $\omega_{1*}$  - кутова швидкість відповідна режиму роботи ДПС з  $U_* = U_{max*}$  і  $B_{OP} = 1$ , при яких комутаційні умови на колекторі нормальні і відповідають швидкості  $\omega_{1*} < 2$ .

Отже, на ділянці  $1 < \omega_* < \omega_{1*}$  регулювання можна характеризувати як раціональне. Значення швидкості  $\omega_{1*}$  визначається за залежністю  $U_*(\omega_*)$  і при  $K_\omega \geq 3$  приймається  $\omega_{1*} = 2$ . В інтервалі кутової швидкості  $\omega_{1*} \leq \omega_* \leq \omega_{max*}$  напругу  $U_*$  необхідно підтримувати незмінною і рівною  $U_{max*} = 1,2 \dots 1,3$  і  $\Phi_* = 0,3 \dots 0,4$ .

Таким чином, регулювання магнітного потоку  $\Phi_*$  відповідно до закону (3.43) і отриманих з нього співвідношень (3.45) і (3.46) можна використовувати тільки в обмеженому інтервалі кутових швидкостей ДПС, а саме  $1 < \omega_* < \omega_{1*}$ . В іншому діапазоні кутових швидкостей механічної характеристики  $M_*(\omega_*)$  його застосування не забезпечує умовам раціонального регулювання з урахуванням першого критерію.

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОТРАКТОРА

#### 4.1 Методики експериментальних досліджень

##### 4.1.1 Методика визначення твердості ґрунту

Твердість ґрунту характеризує його здатність опиратись проникненню в нього будь-якого деформуючого елемента та впливає на основні якісні показники. При проведенні досліджень визначення твердості ґрунту проводилось за стандартною методикою [24] з використанням твердоміру Wile Soil, принцип роботи якого базується на введенні в ґрунт металевого наконечника, що має різні значення діаметрів (1,27 мм для твердих ґрунтів та 1,91 мм для легких ґрунтів). Твердомір встановлювався наконечником вниз суворо перпендикулярно поверхні ґрунту. При цьому щуп твердоміру вводився в ґрунт повільно шляхом натискання на обидві рукоятки з однаковим зусиллям.

Вимірювання проводилися при проникненні щупа в ґрунт на 20 см в п'ятикратній повторності. Точки вимірювань розташовувалися по прямій лінії, крок між ними складав відстань у один метр. Дані експериментальних вимірювань заносили в журнал спостережень та проводилась їх статистична обробка за методикою [25].

##### 4.1.2 Методика визначення вологості ґрунту

Вологість ґрунту, що обробляється, суттєво впливає на технологічний процес. Величину вологості ґрунту було визначено за загальноприйнятими методиками [26], сутність яких полягає у визначенні втрати вологи при висушуванні ґрунту. Відбір, пакування та транспортування проб, а також вибір вимірювальної апаратури проводився у відповідності до положень, наведених в [27].

З метою визначення вологості ґрунту використовувалось сертифіковане обладнання: алюмінієві бюкси, бур, термошафа МО-112, електронні ваги ВТЕ-15-ТЗ-ДВ, а в якості контрольного приладу використовувався вологомір ґрунту

Rapitest 1825. Для визначення вологості ґрунту було використано метод гарячого сушіння. При цьому ґрунтові проби поміщувались у висушені пронумеровані алюмінієві бюкси і витримувалися в сушильній шафі 5 годин при температурі 110 °С. Перед сушінням вони зважувались на електронних вагах. Після сушіння ґрунтові проби знов зважувались та на основі отриманих результатів виконувався розрахунок вологості за формулою

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

де  $m_1$  - маса вологої ґрунтової проби, кг;

$m_2$  - маса сухої ґрунтової проби, кг.

Під час проведення експерименту вологість ґрунту становила 20-22 %.

Отримані дані заносились в журнал реєстрації спостережень.

#### 4.1.3 Методика енергетичної оцінки роботи електротрактора

Енергетичними показниками обробітку ґрунту електротрактором є потужність, необхідна для основного обробітку ґрунту та питомі енерговитрати віднесені до ширини захвату орного агрегату, площі або одиниці об'єму ґрунту, що обробляється. При цьому для проведення енергетичної оцінки роботи електротрактора при оранці ґрунту є питома енергоємність обробітку на одиницю об'єму ґрунту, що обробляється [28]. Цей показник найбільш повно враховує особливості обробітку ґрунту тяговими робочими органами при оранці. Дослідження енергетичних показників функціонування електротрактора проводилися відповідно до [29] і полягали у визначенні потужності, необхідної для оранки та питомої енергоємності ( $E_{num}$ , кВт год./м<sup>3</sup>) оранки ґрунту.

Під час проведення експериментальних випробувань відбувався контроль таких величин: напруга та струм в обмотці тягового електродвигуна, частота обертання та потужність ТЕД, електрична енергія, споживана з мережі. Для проведення дослідження було використано такі електровимірювальні прилади: вольтметр VLM 2/300У; амперметр SD-303В; комплект вимірювальний К-505;

тахометр цифровий безконтактний ВЕМЕТЕСН GM8905; однофазний лічильник НІК 2102-02.

#### 4.1.4 Визначення раціональних параметрів електротрактора

Основними експлуатаційними показниками електротрактора є повна маса  $G$ , номінальна сила тяги  $F_n$  і швидкість руху  $V_n$ , а також максимальна сила тяги  $F_{max}$  і швидкість  $V_{max}$ . При цьому показник  $F_n$  зумовлює вибір номінальної потужності  $P_n$  і номінального моменту  $M_n$  ТЕД и можливість його тривалої роботи за умовами нагрівання. Експлуатаційні показники зазвичай визначаються на початковому етапі розробки електротрактора за результатами аналізу заданих технологічних циклів роботи і умов експлуатації, а також на основі узагальнених техніко-економічних розрахунків. Оскільки в даний час досвід проектування і експлуатації електротракторів з тяговими електродвигунами досить обмежений, виникає необхідність теоретичного обґрунтування оптимальних значень експлуатаційних показників електротрактора.

При вирішенні завдань оптимізації параметрів електротрактораа для адекватного опису області оптимуму використаємо поліном другого порядку:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j,i=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (4.2)$$

де  $y$  - функція мети або параметр оптимізації;

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

$x_i; x_j$  - незалежні змінні або фактори.

Математична модель отримана для опису і дослідження області оптимуму параметра оптимізації електротрактора на основі планів другого порядку - ортогонального центрального композиційного плану (ОЦКП), методика проведення якого детально описана в [30, 31, 32, 33]. При цьому в якості функції мети або параметра оптимізації приймається сила тяги електротрактора  $F$  і в якості незалежних змінних: корисна потужність приводного електродвигуна  $P$ , швидкість руху  $V$  і повна маса трактора  $G$ . Позначення факторів і рівні їх варіювання наведені в таблиці 4.1.

### Фактори варіювання і їх рівні

Фактори	$P, \text{кВт}$	$V, \text{м/с}$	$G, \text{кН}$
Позначення факторів	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Рівні варіювання:			
верхній, $X_{i,B}$	3,0	1,2	2,7
нижній, $X_{i,H}$	0,6	0,4	0,9
нульовий, $X_{i,0}$	1,8	0,8	1,2
Інтервал варіювання	1,2	0,4	0,9

Кодування або нормалізація факторів проводиться за співвідношенням

$$x_i = \frac{X_i - X_{i,0}}{\Delta X_i} \text{ та, відповідно } x_{i,B} = +1; x_{i,H} = -1; x_{i,0} = 0. \quad (4.3)$$

Матриця планування ОЦКП для трьох факторів ( $n = 3$ ) представлена в таблиці 4.2 (стовпці 2, 3 і 4).

Загальна кількість точок плану в факторному просторі становить

$$N = N_\phi + N_\alpha + N_0,$$

де  $N_\phi$  - число дослідів повного факторного експерименту;

$N_\alpha$  - число дослідів в зіркових точках  $N_\alpha = 6$  ;

$N_0$  - число дослідів в центрі плану.

Для ОЦКП другого порядку критерієм оптимізації є ортогональність всіх векторів-стовпців матриці плану, що забезпечується двома шляхами:

1) перетворення квадратичних членів  $x_{i,g}^2$  (стовпці 9а, 10а, 11а) в нові, штучні  $x_i^2$  (стовпці 9, 10 и 11) за формулою

$$x_{i,g}^2 = x_{i,g}^2 - \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N x_{i,g}^2, \quad (4.4)$$

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

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

### Матриця ОЦКП для трьох факторів

№ стовбців		1	2	3	4	5	6	7	8	9a	10a	11a	9	10	11	12	13
Групи точок	g	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	x <sub>3</sub> <sup>2</sup>	x <sub>1</sub> <sup>~2</sup>	x <sub>2</sub> <sup>~2</sup>	x <sub>3</sub> <sup>~2</sup>	y	y
	N <sub>φ</sub>	1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	1,85
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		+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		+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	7,79	7,68
7		+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	2,54	2,57
8		+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	4,04	4,03
N <sub>α</sub>	9	+1	-1,215	0	0	0	0	0	0	+1,476	0	0	+0,7459	-0,7301	-0,7301	2,13	2,1
	10	+1	+1,215	0	0	0	0	0	0	+1,476	0	0	+0,7459	-0,7301	-0,7301	4,85	4,9
	11	+1	0	-1,215	0	0	0	0	0	0	+1,476	0	-0,7301	+0,7459	-0,7301	4,22	4,26
	12	+1	0	+1,215	0	0	0	0	0	0	+1,476	0	-0,7301	+0,7459	-0,7301	2,36	2,29
	13	+1	0	0	+1,215	0	0	0	0	0	0	+1,476	-0,7301	-0,7301	+0,7459	2,56	2,48
	14	+1	0	0	-1,215	0	0	0	0	0	0	+1,476	-0,7301	-0,7301	+0,7459	4,3	4,19
N <sub>0</sub>	15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,7301	-0,7301	-0,7301	3,13	3,1

2) вибором певної величини зоряного плеча  $\alpha$ . При числі факторів  $n = 3$ , приймається розмір плеча  $\alpha = +1,215$ .

Для ортогонального центрального композиційного плану коефіцієнти рівняння регресії визначаються за формулою

$$b_i = \frac{1}{\sum_{g=1}^N x_{i,g}} \sum_{g=1}^N x_{i,g} \cdot y_g, \quad (4.5)$$

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

$y_g$ - значення функції мети за даними порядкових розрахунків по вихідній математичній моделі.

ОЦКП дозволяє отримати математичну модель параметра оптимізації для перетворених і не перетворених квадратних членів

$$\hat{y}_g = \tilde{b}_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}}^n b_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (4.6)$$

де  $b_0$  - перетворений нульовий член рівняння.

$$\hat{y} = \tilde{b}_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}}^n b_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (4.7)$$

При цьому

$$b_0 = \tilde{b}_0 - \sum_{i=1}^n b_{i,i} \cdot \frac{I}{N} \cdot \sum_{g=1}^N x_{i,g}^2. \quad (4.8)$$

Особливість застосування в цій роботі методу планування експерименту полягає в тому, що використовується математична модель з набором розрахункових формул, які визначають функціональну залежність параметра оптимізації від факторів і властивостей досліджуваного об'єкта. Таким чином, застосований математичний експеримент, який визначає сукупність розрахунків для визначення функції мети (таблиця 4.1) відповідно до значень факторів матриці планування за такими рівняннями

$$F = \frac{P \cdot \eta_{\Sigma}}{V} + \psi \cdot G, \quad (4.9)$$

де  $\eta_{\Sigma}$  - сумарний ККД електропривода трактора;

$\psi$  - сумарний коефіцієнт опору руху коліс.

При цьому для даного класу електротракторів, значення  $\eta_{\Sigma}$  і  $\psi$  знаходяться в межах:  $\eta_{\Sigma} = 0,7 \dots 0,8$  і  $\psi = 0,65 \dots 0,85$ . Оскільки при математичному

експерименті відсутня дисперсія відтворюваності функції мети  $S_B^2\{y\}$ , необхідна для статистичної оцінки отриманих даних, значення  $\hat{S}_B^2\{y\}$  вводиться штучно такої величини, щоб забезпечити необхідну точність розрахунків

$$S_B^2\{y\} = (3\sigma)^2 = (3 \cdot 0,02)^2, \quad (4.10)$$

де  $\sigma = 0,02$  - середня квадратична помилка (2 %) або стандарт.

Відповідно до (4.5) отримаємо такі значення коефіцієнтів рівнянь (4.6) і (4.7)

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

Оцінка значущості коефіцієнтів рівнянь регресії визначається за критерієм Стьюдента за умовою

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_B\{y\}} > t_T = 2,131, \quad (4.11)$$

де  $t_{ip} > t_T$  - розрахункове і табличне значення критерію;

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

$S_B\{y\}$  - похибка розрахунків  $y_i$ , рівна  $\sqrt{S_B^2}$  визначається за рівнянням (4.10), і дорівнює  $S_B\{y\} = 0,06$ .

Не вагомими виявилися коефіцієнти  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{123}$  і тому рівняння регресії (4.7) з урахуванням перерахунку вільного коефіцієнта  $\tilde{b}_0$  за рівнянням (4.8) у кінцевому варіанті прийме вид

$$\hat{y} = 3,1 + 1,4x_1 - 1,03x_2 + 0,72x_3 - 0,75x_1x_2 + 0,26x_1^2 + 0,12x_2^2 + 0,22x_3^2. \quad (4.12)$$

За рівнянням (4.11) визначаємо розрахункові значення функції мети  $\hat{y}$  для кожного рядка матриці плану (таблиця 4.2) з урахуванням стовпців 2, 3, 4, 5, 9, а, 10, а і 11, а. Розрахункові дані наведені в стовпці 13.

Адекватність отриманого рівняння регресії (4.12) перевіряємо за F-критерієм Фішера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2 \{\hat{y}\}}{S_B^2 \{y\}} < F_T, \quad (4.13)$$

де  $F_p, F_T$  - розрахункове і табличне значення критерію Фішера;

$S_B^2 \{y\}$  - дисперсія відтворюваності, яка визначається за рівнянням (4.10).

При цьому

$$S_{ад}^2 = \frac{m}{N-d} \sum_{g=1}^N (y_g - \hat{y}_g)^2, \quad (4.14)$$

де  $d$  - число значущих коефіцієнтів рівняння (4.11), враховуючи  $b_0$ , і відповідно,  $N-d=7$ ;

$m$  - число паралельних дослідів. Приймається при математичному експерименті  $m=1$ .

Значення  $y_g$  и  $\hat{y}_g$  визначаються за кожним рядком в стовпцях 12 та 13 таблиці 4.2.

За результатами розрахунків  $S_{ад}^2 = 0,0093$  з урахуванням (4.10)  $S_B^2 \{y\} = 0,0036$  і табличного значення  $F_T = 2,64$  умову (4.13) можна записати у вигляді

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

тому рівняння регресії (4.12) є адекватним.

## 4.2 Аналіз результатів визначення раціональних параметрів електротрактора

Рівняння регресії (4.12) з урахуванням даних таблиці 4.2 та співвідношеннями між факторами в фізичних і кодованих одиницях

$$P = x_1 \cdot 1,2 + 1,8[\text{кВт}]; V = x_2 \cdot 0,4 + 0,8[\text{м/с}]; G = x_3 \cdot 0,9 + 1,2[\text{кН}] \quad (4.15)$$

може бути представлено через фактори  $P$ ,  $V$  и  $G$  в фізичних одиницях

$$F = 1,531 + 1,517P - 0,965V - 0,145G - 1,56PV + 0,25P^2 + 0,75V^2 + 0,27G^2. \quad (4.16)$$

Отримано адекватне рівняння параметра оптимізації електротрактора в наведеному вигляді досить ускладнює дослідження області оптимуму, тому його необхідно представити в типовій канонічній формі. Перехід до канонічної форми виконується перенесенням початку координат факторного простору в точку центру поверхні відгуку і поворотом осей на певний кут в факторному просторі. При цьому паралельне перенесення початку координат в центр, усуває лінійні члени і змінює величину вільного члена в вихідному рівнянні, а поворот осей відкидає взаємодію факторів.

В результаті канонічного перетворення, рівняння (4.12) прийме вид

$$Y - Y_s = B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2, \quad (4.17)$$

де  $Y$  - значення параметра оптимізації;

$Y_s$  - значення параметра оптимізації в центрі поверхні 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 поворот осей здійснюється за відомими правилами аналітичної геометрії [30]. Для визначення координат нового центру поверхні відгуку  $X$  для рівняння (4.12) необхідно виконати диференціювання по кожній змінній  $x$  і окремі похідні прирівняти до нуля

$$\begin{aligned}\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} &= 1,4 - 0,75x_2 + 0,52x_1 = 0, \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} &= -1,03 - 0,75x_1 + 0,24x_2 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} &= 0,72 + 0,44x_3 = 0.\end{aligned}\tag{4.18}$$

Розв'язуючи систему рівнянь (4.18), отримаємо значення координат центру поверхні відгуку  $S_z$

$$x_{1s} = -0,997; \quad x_{2s} = 2,558; \quad x_{3s} = -1,636.\tag{4.18}$$

При підстановці значень координат у вихідне рівняння (4.12) визначаємо величину параметра оптимізації:  $Y_s = 1,432$ .

Координатам  $x_{1s}$ ,  $x_{2s}$  і  $x_{3s}$ , а також величині  $X$  відповідають наступні значення чинників і функцій мети в фізичних одиницях згідно (4.16)

$$\begin{aligned}P &= x_{1s} \cdot 1,2 + 1,8 = 0,6 \text{ кВт}; \\ V &= x_{2s} \cdot 0,4 + 0,8 = 1,82 \text{ м/с}; \\ G &= x_{3s} \cdot 0,9 + 1,2 = 0,27 \text{ кН}; \\ F &= 1,432 \text{ кН}.\end{aligned}\tag{4.20}$$

Для отримання аналітичної та графічної інтерпретації області оптимуму параметра оптимізації, описаного рівнянням (4.12), а також визначення експлуатаційних показників електротрактора близьких до оптимальних, скористаємося методом двовимірних перерізів поверхні відгуку. Побудова двовимірних перерізів поверхні відгуку параметра оптимізації виконується в такій послідовності [31]. У рівняння регресії (4.12), незалежно від кількості факторів, вводимо значення всіх факторів, близьких до оптимальних значень, або рівних нульовому рівню, крім двох. У результаті рівняння (4.12) набуває вигляду рівняння регресії, що виражає залежність параметра оптимізації від двох чинників. Здійснюємо перетворення рівняння до канонічного виду. Визначаємо координати центру поверхні відгуку  $S_z$  і величини параметра оптимізації в центрі  $Y_s$ . Потім приймаючи різні значення параметра оптимізації  $Y_s$  у канонічному рівнянні, виконуємо двовимірні перерізи поверхні відгуку і будуємо криві

рівного відгуку, що мають назву контурних кривих поверхні відгуку, за якими оцінюється зміна величини критерію оптимізації в залежності від варіювання рівнів кожної пари факторів і визначаються їх значення, близькі до оптимальних.

Розглянемо стосовно до отриманого рівняння регресії (4.12) три варіанти двовимірних перерізів поверхні відгуку з побудовою та аналізом сімейства контурних кривих.

1. Приймаємо в (4.12)  $x_1 = 0$ , що відповідає значенню фактору  $P = 1,8 \text{ кВт}$ . Двовимірний перетин поверхні відгуку в цьому випадку буде характеризувати параметр оптимізації в залежності від швидкості руху ( $x_2$ ) і маси ( $x_3$ ) мотоблока. Рівняння (4.12) прийме вид

$$\hat{y} = 3,1 - 1,03x_2 + 0,72x_3 + 0,12x_2^2 + 0,22x_3^2. \quad (4.21)$$

Визначимо координати центру поверхні  $S_z$  в результаті рішення системи рівнянь в частинних похідних

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} &= -1,03 + 0,24x_2 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} &= 0,72 + 0,44x_3 = 0; \\ x_{2s} &= 4,292; \quad x_{3s} = -1,636. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Після підстановки значень  $x_{2s}$  і  $x_{3s}$  в (4.22) визначимо величину параметру: оптимізації  $Y_s = 0,301$ . Проводимо канонічне перетворення рівняння (4.18), характеристичний детермінант якого має вигляд

$$f(B) = \begin{vmatrix} b_{11} - B & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{11} - B \end{vmatrix} = 0. \quad (4.23)$$

Рішення рівняння (4.12) запишемо у вигляді  $B^2 - a_1B + a_2 = 0$ , де  $a_1 = (b_{11} + b_{22}) = 0,12 + 0,22 = 0,34$ ;  $a_2 = (b_{11} \cdot b_{22} - 0,25b_{12}^2) = (0,12 \cdot 0,22 - 0,23 \cdot 0^2) = 0,0264$ , і

після підстановки отримаємо

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

Два кореня цього рівняння  $B_{11} = 0,12$  і  $B_{22} = 0,22$  визначають значення коефіцієнтів рівняння регресії в канонічній формі

$$Y - 0,301 = 0,12X_1^2 + 0,22X_2^2. \quad (4.24)$$

Так як коефіцієнти  $B_{11}$  і  $B_{22}$  мають однакові знаки, то контурні криві будуть еліпсами. Контурні криві для значень  $Y_s = 0,301$  (центр); 0,29; 0,27; 0,25; 0,23; 0,21; 0,19 приведені на рисунку 4.1.

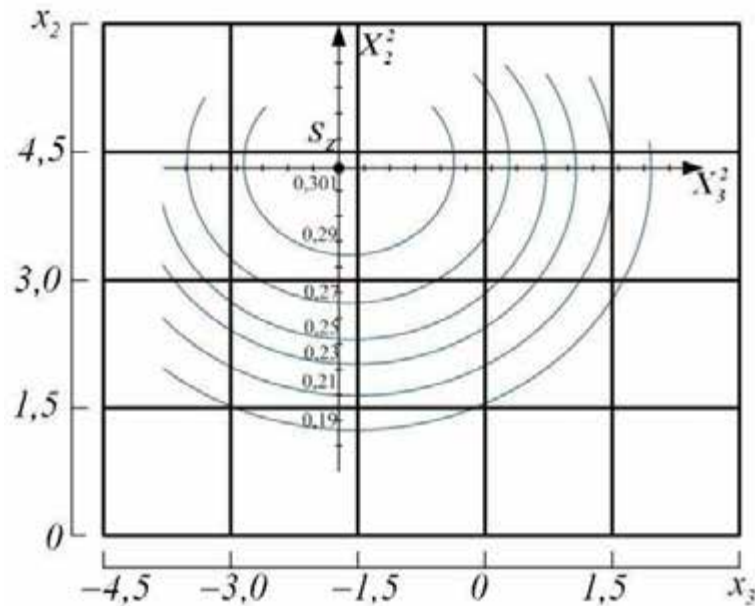


Рис. 4.1. Контурні криві перетинів поверхні відгуку при ( $x = 0$ ,  $P = 1,8$  кВт) і значеннях  $Y_s = 0,301$ ; 0,29; 0,27; 0,25; 0,23; 0,21; 0,19.

Дані рис. 4.1 свідчать, що максимальне значення параметра оптимізації в перерізі дорівнює  $0,301$  кН і має місце при швидкості руху  $x_{2s} = 1,636$ , або відповідно до (4.15), в фізичних одиницях  $V = 2,52$  м/с і  $G = 0,27$  кН. Згідно області оптимуму при  $Y_s = 0,29$  і  $P = 1,8$  кВт, значення розглянутих факторів близькі до оптимальних знаходяться в межах  $V = 2,2 \dots 3,0$  м/с і  $G = 1,3 \dots 0,83$  кН.

2. Приймаємо в (4.12)  $x_2 = 0$ , що відповідає значенню фактору  $V = 0,8$  м/с. Двовимірний перетин поверхні відгуку в цьому випадку буде характеризувати параметр оптимізації в залежності від потужності ( $x_1$ ) і маси ( $x_3$ ) електротрактора. Рівняння (4.12) прийме вид

$$\hat{y} = 3,1 + 1,4x_1 + 0,73x_3 + 0,26x_1^2 + 0,22x_3^2. \quad (4.25)$$

Визначимо координати центру поверхні і величину параметру оптимізації

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} &= 1,4 + 0,52x_1 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} &= 0,72 + 0,44x_3 = 0. \end{aligned} \quad (4.26)$$

В результаті рішення системи отримуємо  $x_{1s} = 2,692$ ;  $x_{3s} = 1,636$  і  $Y_s = 0,626$ .

Розв’язок характеристичного детермінанта (4.23) для цього випадку має вигляд

квадратного рівняння  $B^2 - 0,48B + 0,0572 = 0$ , корені якого дорівнюють  $B_{11} = 0,22$  і  $B_{22} = 0,28$ , а рівняння в канонічній формі має вид

$$Y - 0,626 = 0,22X_1^2 + 0,28X_2^2. \quad (4.27)$$

У цьому випадку контурні криві також будуть мати форму еліпса (рис. 4.2).

За рис. 4.2, у перерізі поверхні відгуку максимальне значення параметра оптимізації дорівнює  $0,626 \text{ кН}$  має місце при потужності електродвигуна  $x_{1s} = 2,692$  і повній масі  $x_{3s} = 1,636$  або в фізичних одиницях  $P = 1,43 \text{ кВт}$  і  $G = 0,27 \text{ кН}$ . З області умовного оптимуму при  $Y_s = 0,6 \text{ кН}$  впливає, що значення розглянутих факторів  $P$  і  $G$  близькі до оптимального знаходяться в межах  $P = 0,6 \dots 2,0 \text{ кВт}$  і  $G = 1,2 \dots 0,83 \text{ кН}$  при  $V = 0,8 \text{ м/с}$ .

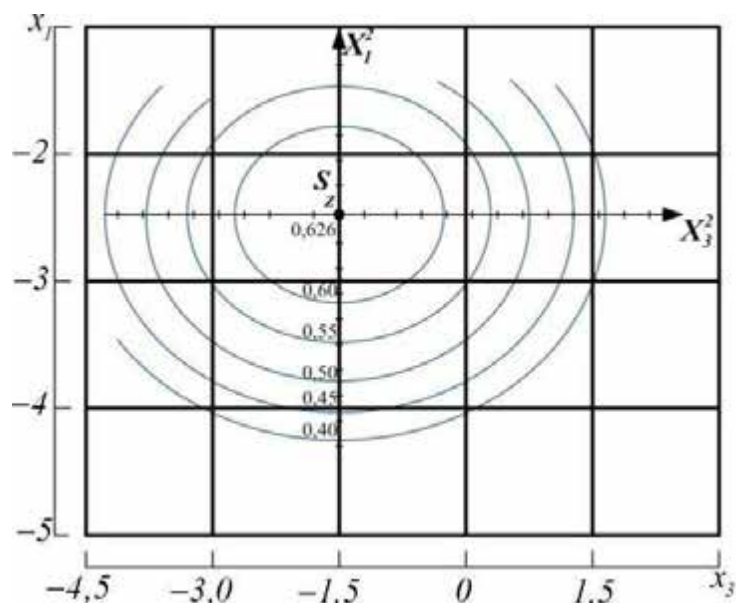


Рис. 4.2. Контурні криві перетинів поверхні відгуку при  $x_2=0$  ( $V=0,8$  м/с) і значеннях  $Y_s = 0,626$  (центр); 0,6; 0,55; 0,5; 0,45; 0,4.

3. Приймаємо в (3.11)  $x_3 = 0$ , що відповідає значенню фактору  $G = 1,2$  кН. Двовірний перетин поверхні відгуку в цьому випадку буде характеризувати параметр оптимізації в залежності від потужності ( $x_1$ ) і швидкості ( $x_2$ ). При канонічному перетворенні рівняння (4.12) для даного випадку крім перенесення початку координат в нову точку, здійснюється також поворот осей на деякий кут  $\alpha$  в факторному просторі, в результаті чого в рівнянні (4.12) відсутня парна взаємодія факторів ( $x_1 \cdot x_2$ ). За [65,66] кут повороту осей визначається так:

$$\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{b_{11} - b_{22}}{b_{12}}. \quad (4.28)$$

У нашому випадку

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

що відповідає куту  $\alpha = -36^\circ 12'$ .

Остаточне вихідне рівняння (4.25) набуде вигляду

$$\hat{y} = 3,1 + 1,4x_1 - 1,03x_2 + 0,26x_1^2 + 0,12x_3^2. \quad (4.29)$$

Визначимо координати центру поверхні відгуку диференціюванням рівняння (4.29) і розв'язком системи

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} &= 1,4 + 0,52x_1 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} &= -1,03 + 0,24x_2 = 0. \end{aligned} \quad (4.30)$$

звідки

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

Значення параметра оптимізації в центрі поверхні відгуку визначиться в результаті підстановки в (4.28) координат  $x_{1s}$  і  $x_{2s}$

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

Рівняння регресії (4.28) у канонічній формі буде мати вигляд

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

Оскільки коефіцієнти канонічного рівняння  $B_{11}$  і  $B_{22}$  мають однакові знаки, то контурні криві двовимірних перерізів поверхні відгуку представляють собою еліпси. Контурні криві перетинів поверхні відгуку при  $x_3 = 0$  і значеннях параметра  $Y_s = 0,9; 0,8; 0,7; 0,6$  і  $0,5$  наведені на рис. 4.3.

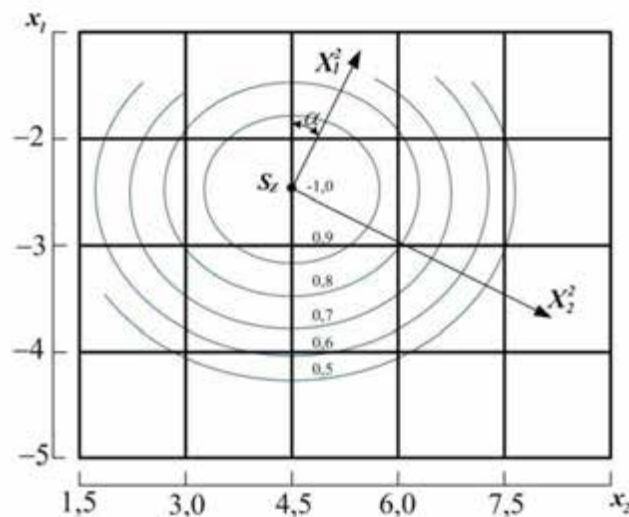


Рис. 4.3. Контурні криві двовимірних перерізів поверхні відгуку при  $x_3 = 0$  ( $G = 1,2$  кН) і значеннях  $Y_s = 0,9; 0,8; 0,7; 0,6$  і  $0,5$

З рис. 4.3 випливає, що в перерізі поверхні відгуку максимальне значення параметра оптимізації  $Y_s = -1,0$  кН має місце при значеннях факторів  $x_{1s} = -2,69$  і  $x_{2s} = 4,29$  або в фізичних одиницях відповідно до (4.29) потужність  $P = 1,43$  кВт і швидкість  $V = 2,2 \dots 3,0$  м/с при  $G = 1,2$  кН.

За отриманими кривими двовимірних перерізів поверхонь відгуку (рис. 4.1-4.3) можна судити про зміну величини критерію оптимізації  $F$  в залежності від кодіваних і натуральних значень розглянутих факторів. Виконання всіх можливих двовимірних перерізів поверхонь відгуку дає наочне уявлення про значення критерію оптимізації при варіюванні рівнів кожної пари факторів.

Узагальнюючи отримані результати для даного класу електротракторів основні експлуатаційні показники близькі до оптимальних з урахуванням реальних умов роботи агрегатів можуть бути визначені в межах:

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

### 4.3 Аналіз результатів польових досліджень електротрактора

Польові випробування дослідного зразку електротрактора проводилась на контрольних ділянках при оранці ґрунту. Попередніми культурами були картопля та огірки. Робота проводилась при весняній оранці, рельєф ділянок - рівний, за механічними властивостями ґрунт представляв собою дерновий глинисто-піщаний.

При проведенні польових випробувань контролювалися значення напруги, струму та частоти обертання тягового двигуна, глибини обробітку ґрунту, швидкості пересування мотоблоку, та витрати електричної енергії .

Проведення польових випробувань виконувалось на різних швидкостях пересування агрегату та глибинах обробітку ґрунту (заглибленнях плуга). Мінімальна швидкість при оранці регламентувалась керівництвом з експлуатації трактора [34] при роботі з плугом П1-20/2, та склала 2 км/год. Максимальне значення швидкості обмежувались виходячи із значення твердості ґрунту та фізичними можливостями оператора.

Струмо-часові характеристики тягового електродвигуна при різних значеннях глибин обробки ґрунту наведені на рис. 4.4. Аналіз характеристик свідчить, що при глибині обробки 10, 15 і 20 см, середній струм якоря відповідно склав 5,9, 10,1 і 14,8 А, що свідчить про значення коефіцієнта завантаження тягового двигуна від 0,37 до 0,93, тобто двигун працює без перевантаження при роботі на максимальній глибині обробітку ґрунту.

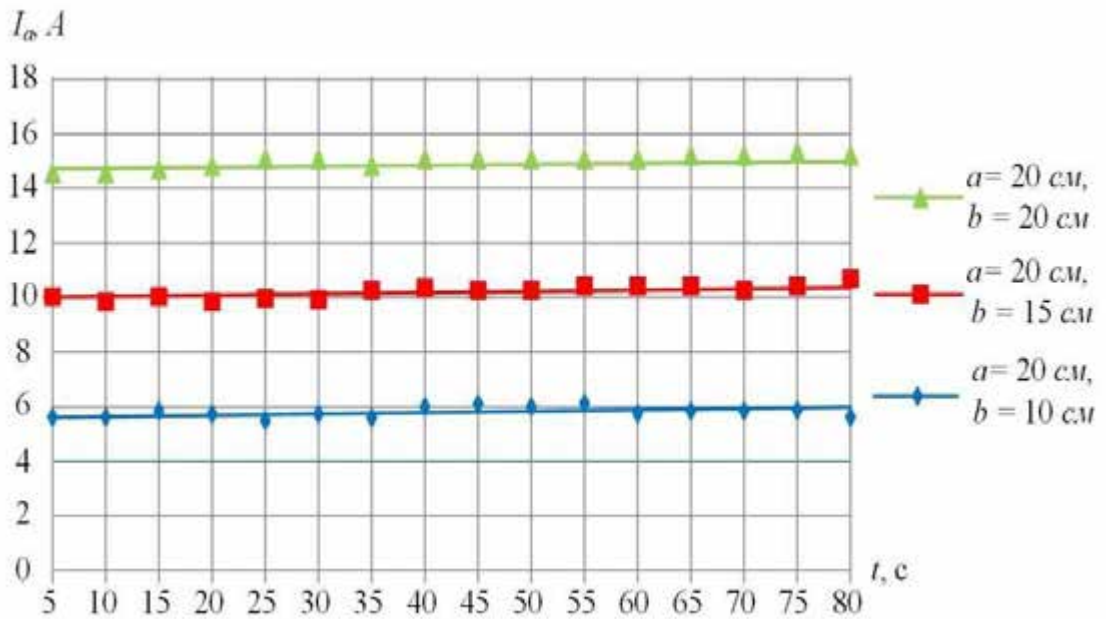


Рис. 4.4. Струмо-часова характеристика електродвигуна привода електротрактора

Для визначення питомої енергоємності процесу основного обробітку ґрунту електротрактором з плугом використаємо залежність

$$E_{\text{пит}} = \frac{P}{Q_v}, \quad (4.31)$$

де  $E_{\text{пит}}$  - питома енергоємність, кВтгод./м<sup>3</sup>;

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

Значення об'ємної продуктивності електротрактора визначаємо за рівнянням

$$Q_v = b v_n h \cdot 10^3, \quad (4.32)$$

де  $u$  - ширина захвату агрегату, м;

$v_n$  - лінійна швидкість переміщення мотоблоку, км./год.;

$h$  - глибина обробки ґрунту, м.

Таблиця 4.3

### Результати польових випробувань електротрактора

Найменування	Склад агрегату
--------------	----------------

показника, розмірність	Електротрактор+ плуг П1-20/2									
Умови проведення випробувань										
Вид роботи	Основна обробка ґрунту									
Попередня обробка ґрунту	-									
Характеристика поля	Уклін 0°									
Вологість ґрунту, %	19,4 (19,8)									
Твердість ґрунту, МПа	0,8 (1,0)									
Режими роботи електротрактора										
- робоча ширина захвату, м	0,2									
- швидкість руху, 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 (0,184)	0,192 (0,191)	0,201 (0,201)	0,198 (0,197)	0,21 (0,205)	0,21 (0,2)	0,192 (0,19)	0,204 (0,21)	0,208 (0,22)	
Енергетичні показники роботи електротрактора										
- 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 енергоємність, 10 <sup>-3</sup> 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)	
- буксування 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)	

Отримані залежності споживаної потужності електродвигуна привода електротрактора для оранки ґрунту від швидкості руху (рис. 4.5), що характеризують умови польових випробувань.

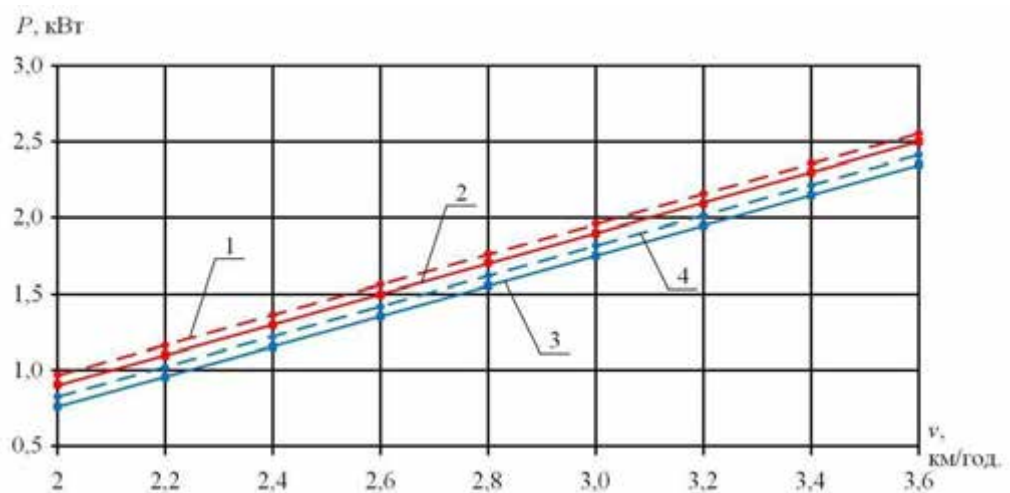


Рис. 4.5 - Залежність потужності оранки ґрунту  $P$  від швидкості руху  $v$  електротрактора при твердості ґрунту  $H=1,0$  МПа: експериментальна (1) і

розрахункова (2); при твердості ґрунту  $H=0,8$  МПа: розрахункова (3) і  
експериментальна (4)

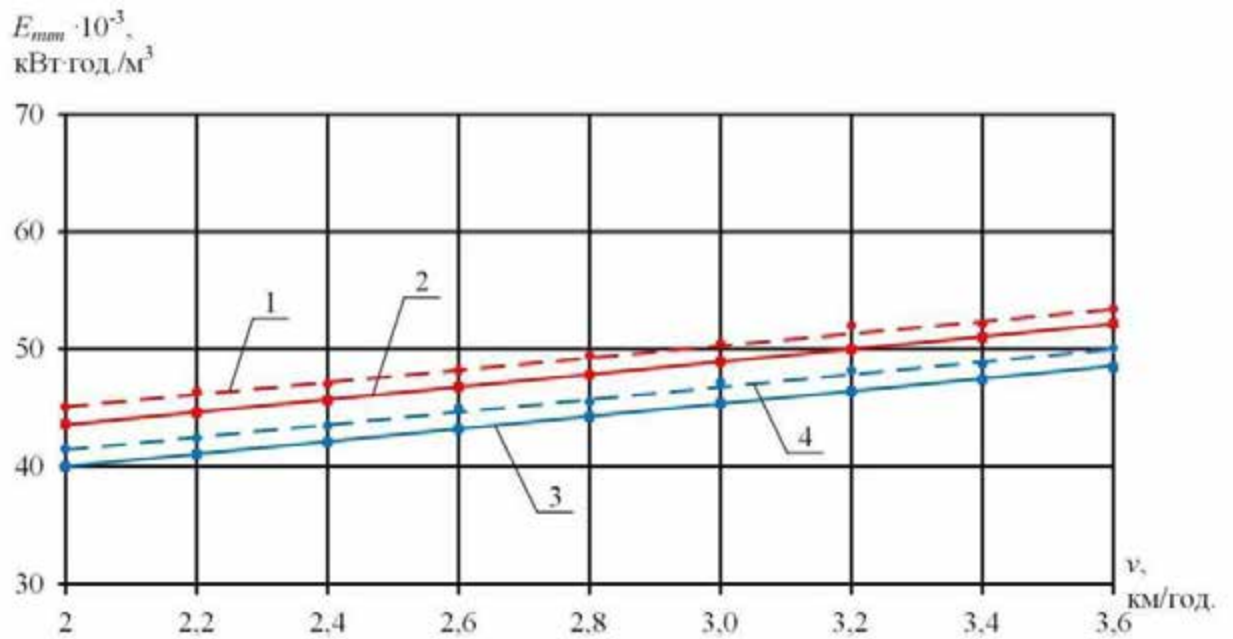


Рис. 4.6. Залежність питомої енергоємності  $E_{nut}$  оранки ґрунту від швидкості руху  $v$  електротрактора при твердості ґрунту  $H=1,0$  МПа: експериментальна (1) і розрахункова (2); при твердості ґрунту  $H=0,8$  МПа: розрахункова (3) і експериментальна (4)

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТРАКТОРОМ

#### 5.1 Система керування електричним трактором

Система керування електричним трактором показана на рис. 5.1. Мінітрактор приводиться в рух двигуном BLDC. Рухайна сила передається на ведучі колеса та ВОМ через механізм передачі. Контролер відповідає за роботу, управління та контроль трактора. З одного боку, контролер електричного трактора визначає наміри водія за допомогою педалі акселератора, педалі гальма та вибору умов роботи, а потім контролер електричного трактора надсилає сигнали управління швидкістю двигуна до контролера двигуна BLDC відповідно до стратегії управління. Контролер двигуна BLDC приймає сигнали регулювання швидкості для управління двигуном, щоб той працював із заданою швидкістю. З іншого боку, контролер електричного трактора отримує сигнали системи управління акумулятором, включаючи SOC акумулятора, розрядний струм, напругу на клеммах та температуру, тому контролер електричного трактора реалізує функції контролю та захисту. Система моніторингу взяла на себе контроль за струмом, напругою та температурою двигуна та іншого електрообладнання, яке одночасно надсилало ці сигнали до контролера електричного трактора для оцінки безпеки електрообладнання.

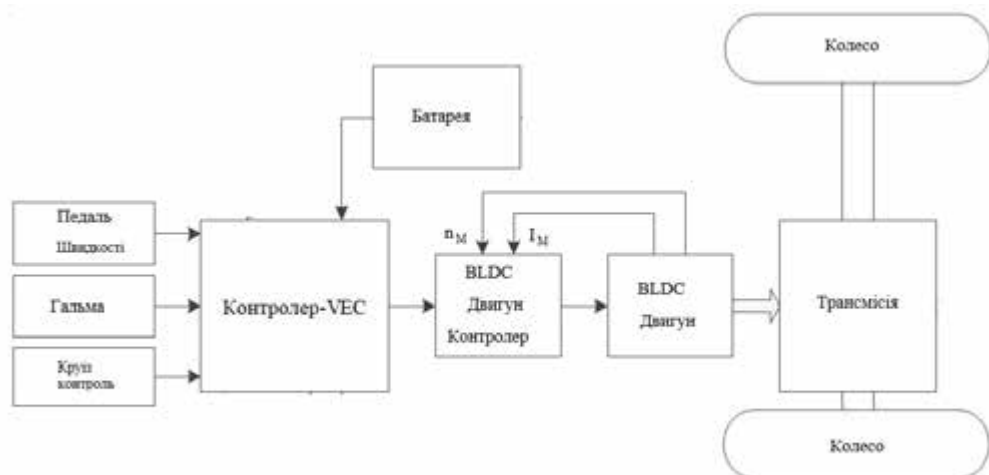


Рис. 5.1. Система керування електричним трактором

Система керування двигуном електричного трактора повинна виконувати дві основні функції. По-перше, оскільки стабільність швидкості трактора відносно вплинула на якість польових робіт, система управління двигуном повинна підтримувати швидкість трактора завжди відстежуючи встановлене значення швидкості. По-друге, система управління приводом двигуна повинна регулювати струм двигуна і покращувати динамічну реакцію двигуна, оскільки трактор зазнав відносно значних коливань навантаження, що призвело б до коливання швидкості, отже, це могло призвести до стрибка напруги двигуна і навіть до пошкодження двигуна.

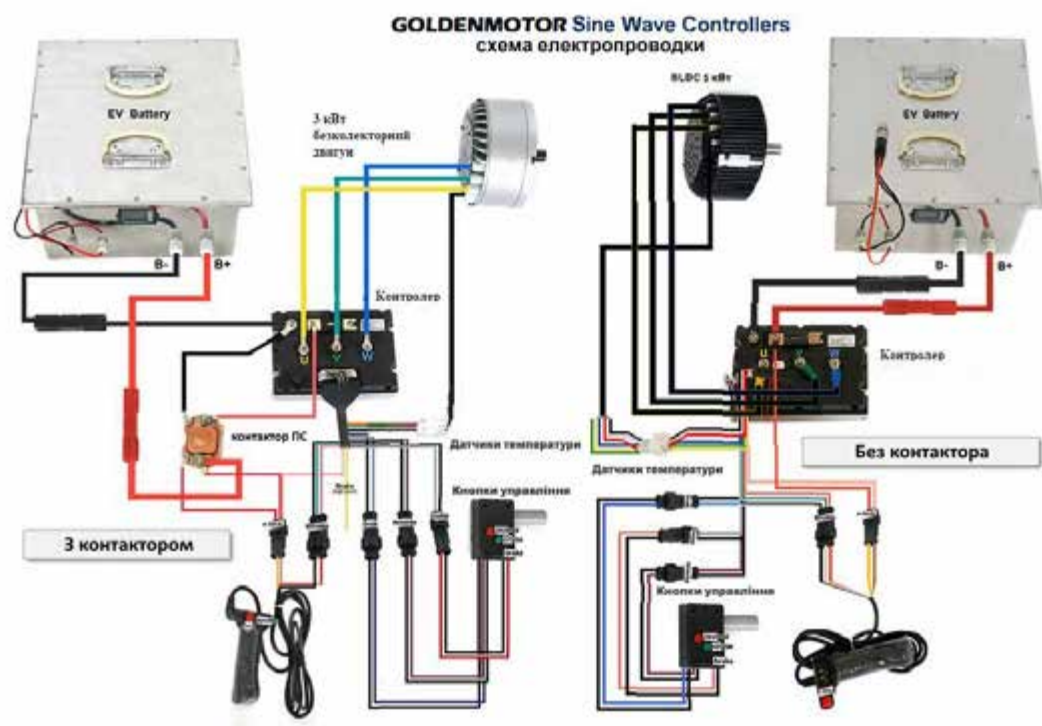


Рис. 5.2. Схема електропроводки контролера з контактором ПС (а) та без контактора (б)

**Активация гальма** здійснюється шляхом замикання контактів між собою в колодці brake або подачею 12в з бортового джерела живлення транспортного засобу на відповідний вивід контролера.

**Включення реверсу.** При русі «Вперед» кінці з роз'єму "reverse" повинні бути розімкнуті, а при русі Назад замкнуті.

**Для круїз-контролю** є звичайна кнопка з самоповерненням. Для переходу в режим круїз-контролю необхідно її натиснути і утримувати, одночасно з цим

ручкою *trottle* виставити бажану швидкість, потім відпустити кнопку і відпустити ручку акселератора. Деактивація здійснюється натисканням на гальмо або повторним поворотом ручки.

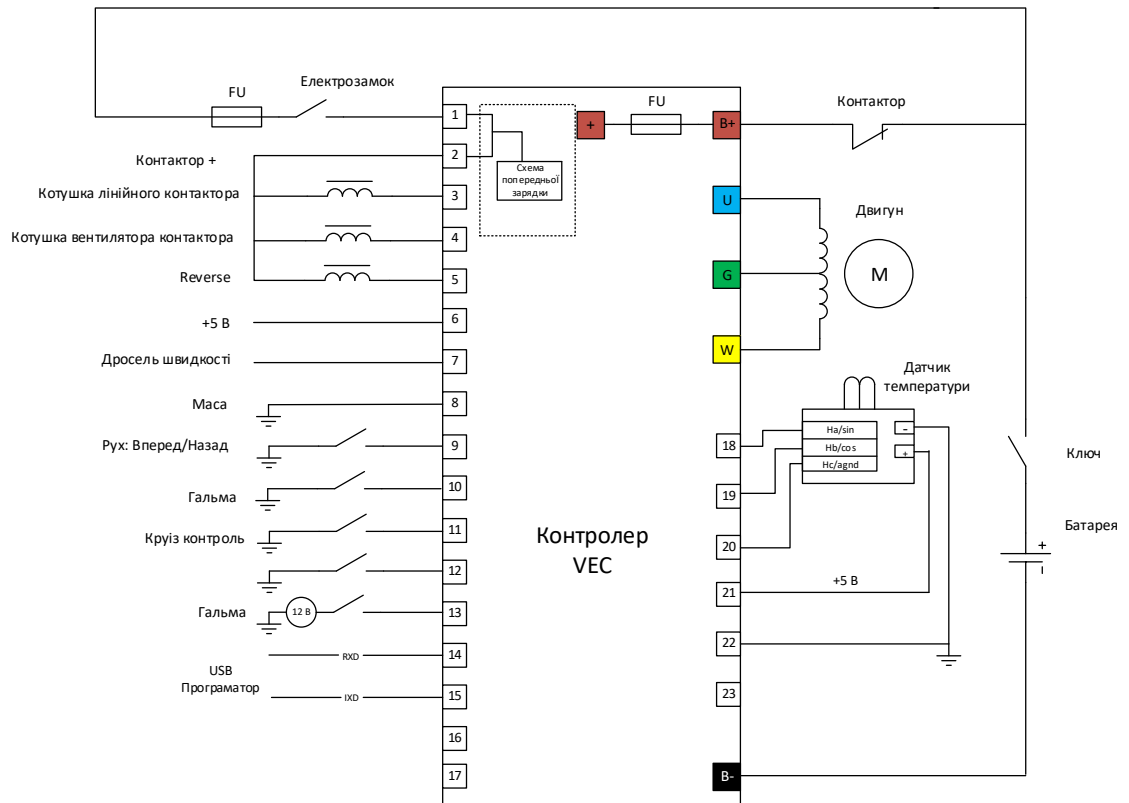


Рис. 5.3. Схема електропроводки контролера

## 5.2 Програмування контролера VEC-500

**Hall electrical angle** – зсув фаз датчиків Холла (значення=120 град, 60 град.)  
Двигуни Golden Motor мають зсув фаз =120 град.

**Rated motor speed (rpm)** – частота обертів двигуна (об/хв). Вибираємо 6000 об/хв.

**Nominal battery voltage (V)** – номінальна напруга батареї. Ставимо 48 В.

**High voltage protection value (V)** – Захист контролера і АКБ: відключення при перевищенні максимально допустимої напруги. Відключається тільки рекуперація.



Рис 5.4. Вікно програмування контролера

***High voltage protection exit value (V)*** – Захист контролера і АКБ: відключення при перевищенні максимально допустимої напруги. При перезарядці батареї відключається рекуперація і контролер повністю іде в захист.

***Low voltage protection exit value (V)*** – Захист контролера і АКБ: відключення при перевищенні мінімально допустимої напруги.

***Low voltage triggering current reducing (V)*** – зниження струму споживання від батареї при низькій напрузі живлення.

***Starting phase current (A)*** – стартовий фазний струм (впливає на тягу і прискорення при старті). Ставимо 300 А.

***Maximum phase current (A)*** – максимальний фазний струм. Ставимо 300 А.

***Maximum phase current duration (s)*** – тривалість роботи з максимальним фазним струмом. Ставимо 10 сек.

***Rated phase current duration (s)*** – номінальний постійний струм. Ставимо 280 А.

***Battery drawn current limit*** – обмеження батарееного струму. Ставимо 135 А.

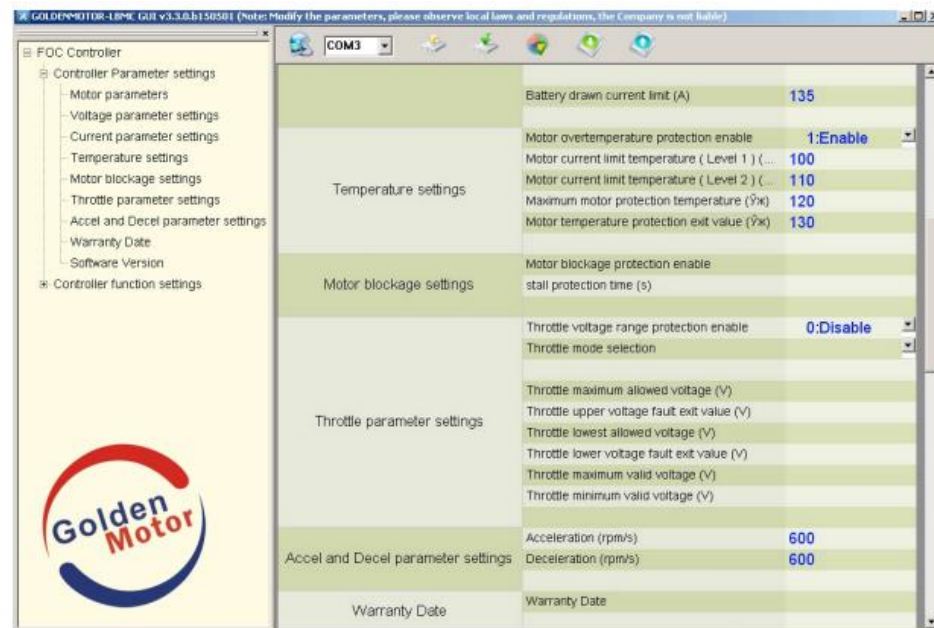


Рис. 5.5. Вікно налаштування контролера, датчики температури двигуна

***Motor overtemperature protection enable*** – Включення функції

Температурних налаштувань: 1: Enable – включити, 0: Disable – відключити.

***Motor current limit temperature (Level 1)*** – Температурний ліміт в двигуні - Рівень 1. Ставимо =100 С.

***Motor current limit temperature (Level 2)*** – Температурний ліміт в двигуні - Рівень 2. Ставимо =110 С.

***Maximum motor protection temperature*** – Максимальний температурний захист. Ставим = 120 С.

***Maximum motor protection exit temperature*** – Максимальна температурна защита з відключенням двигуна. Ставим = 130 С.

Налаштування швидкості (педаль\ручка):

***Throttle voltage range protection enable*** – Включення функції налаштувань швидкості: 1: Enable – включити, 0: Disable – виключити. Виключаємо для ручки газу.

## РОЗДІЛ 6

### ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОТРАКТОРА

Багаторічний досвід експлуатації і високий рівень теорії мобільних сільськогосподарських машин дозволяє з достатньою точністю визначити їх основні енергетичні і техніко-економічні показники при виконанні основних видів польових робіт. Аналогічні ж дані мобільних електрифікованих агрегатів не можуть бути повноцінними і точними, так як досвід їх розробки і експлуатації занадто незначний. Тому при порівняльних розрахунках економічної ефективності мотоблоків з двигуна внутрішнього згорання і тяговими електродвигунами неминучі деякі спрощуючі припущення і усереднені дані.

Для визначення економічної ефективності трактора з ТЕД можна скористатися Типовою методикою [35], згідно з якою річний економічний ефект нової техніки визначається як різниця приведених витрат порівнюваних тракторів з ДВЗ і ТЕД

$$E_p = B_m - B_e, \quad (6.1)$$

де  $E$  - очікуваний річний економічний ефект трактора з ТЕД;

$B_m, B_e$  - річні приведені витрати відповідно тракторів з ДВЗ і ТЕД.

При цьому

$$B_m = P_m + E_n \cdot k_m; \quad (6.2)$$

$$B_e = P_e + E_n \cdot k_e, \quad (6.3)$$

де  $P_m, P_e$  - річні експлуатаційні витрати на трактори з ДВЗ і ТЕД, грн.;

$k_m, k_e$  - капітальні вкладення, рівні ринковій вартості тракторів з ДВЗ і ТЕД, грн.;

$E_n$  - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

За [36, 37] при оцінці ефективності засобів малої механізації і автоматизації в сільськогосподарському виробництві рекомендується  $E_n=0,65...1$ . Для подальшого розрахунку приймаємо  $E_n=0,8$ .

У свою чергу річні експлуатаційні витрати тракторів можна представити у вигляді двох складових

$$P_m = C_m + C_{\text{пал.}}; \quad (6.4)$$

$$P_e = C_e + C_{ee}, \quad (6.5)$$

де  $C_m, C_e$  - постійні складові експлуатаційних витрат тракторів, які практично не залежать від витрат енергії, що включають в загальному випадку амортизаційні відрахування на капремонт і реновацію, витрати на поточний ремонт і техобслуговування, інші прямі витрати, грн. ;

$C_{\text{п}}, C_{ee}$  - річні витрати на паливо для тракторів з ДВЗ і електроенергію для тракторів з ТЕД, грн.

При цьому річні витрати на рідке паливо визначаються за виразом

$$C_n = P_n \cdot q \cdot T_p \cdot \eta \cdot \text{Ц}_n, \quad (6.6)$$

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

$q$  - питома витрата рідкого палива, л/(кВтгод.);

$T_p$  - річна тривалість роботи трактора;

$\eta$  - коефіцієнт використання потужності ДВЗ при виконанні основного технологічного процесу - оранки ґрунту. Приймається  $\eta=0,7...0,8$ .

$\text{Ц}_n$  - вартість одного літра рідкого палива, грн.

Витрати на електроенергію для трактора можна визначити за виразом

$$C_{ee} = \frac{P_n \cdot k_3}{\eta_n \cdot K_{e.m.}} \cdot T_p \cdot \text{Ц}_e, \quad (6.7)$$

де  $P_n$  - номінальна потужність ТЕД електротрактора, кВт;

$k_3$  - коефіцієнт завантаження ТЕД. Приймається  $k_3=0,85$ ;

$\eta_n$  - номінальний ККД ТЕД трактора, в.о.;

$K_{e.m.}$  - коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі живлення і гнучкому кабелі. Приймаємо  $K_{e.m.}=0,95$  [38];

$\text{Ц}_e$  - тарифна вартість 1 кВтгод електроенергії встановлена НКЕР України на розрахунковий рік.

У першому наближенні постійні складові експлуатаційних витрат, які не пов'язані з витратою електроенергії і ПММ при роботі тракторів можна прийняти рівними для обох порівнюваних варіантів, тобто.

$$C_m = C_e. \quad (6.8)$$

В результаті вираз (6.1) з урахуванням (6.8) прийме вид

$$E_p = (C_n + E_n K_m) - (C_{e.e.} + E_n K_e). \quad (6.9)$$

Вихідні дані для розрахунків наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

### Технічні характеристики порівнюваних варіантів тракторів

Марка	Паливо	Потужність, кВт	Питома витрата палива, г/кВтгод	Вартість, грн.	Маса, кг
Трактор Берарус-132Н	А-92	8,7	0,313	130000	532
Електротрактор	Електроенергія	8,0	-	145000	550

2. Розрахунковий час роботи тракторів протягом року в теплицях і на присадибних ділянках приймається рівним  $T_p = 1000$  год.

3. Вартість 1 кВт·год. електроенергії відповідно до тарифу встановленим НКРЕ України на 2020 рік для об'єктів АПК приймається  $C_{e.e.} = 1,68$  грн/кВт·год.

4. Розрахункова вартість одного літра рідкого палива  $C_n$  приймається рівною для бензину А-92-25 грн/л.

Розрахунок річного економічного ефекту електротрактора.

Річні витрати на рідке паливо і електроенергію порівнюваних варіантів тракторів і вихідними даними дорівнюватимуть:

- для трактора з ДВЗ:

$$C_{\pi} = 8,7 \cdot 0,313 \cdot 1000 \cdot 0,75 \cdot 25 = 51058 \text{ грн.}$$

- для електротрактора 51058

$$C_{ee} = \frac{8 \cdot 0,85}{0,8 \cdot 0,85} \cdot 1000 \cdot 1,68 = 16800 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект застосування електротрактора:

$$E_p = (51058 + 0,8 \cdot 130000) - (16800 + 0,8 \cdot 145000) = 22258 \text{ грн.}$$

Розрахунковий термін окупності витрат на електротрактор порівняно з трактором з ДВЗ визначиться за формулою:

$$T = \frac{\Delta K}{E_p \cdot \kappa_e}, \quad (6.10)$$

де  $\Delta K$  - різниця капітальних вкладень або вартості трактора з ДВЗ та електротрактора;

$\kappa_e$  - коефіцієнт використання трактора протягом року, в.о. З урахуванням того, що трактор експлуатується протягом 8 місяців на рік,  $\kappa_e = 0,67$ .

При цьому термін окупності

$$T = \frac{145000 - 130000}{22258 \cdot 0,8} = 0,84 \text{ року.}$$

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було переобладнано міні-трактор Беларус-132Н з двигуна внутрішнього згорання GX390 на електричний двигун постійного струму BLDC потужністю 8 кВт.

Розглянуто стан та перспективи застосування електричних тракторів як зарубіжного, так і вітчизняного виробництва.

Проведено дослідження принципу роботи електричного двигуна та стратегія керування на базі контролера VEC-500 компанії Golden Motors та його програмування.

Досліджено вплив експлуатаційних показників та тягових характеристик на параметри регулювання, розрахункову і номінальну потужності приводного електродвигуна при оранці ґрунту.

Теоретичними дослідженнями встановлено раціональні параметри електротрактора при обробітку ґрунту: потужність приводного електродвигуна 1,0 – 3,0 кВт; лінійна швидкість руху 0,6 – 1,0 м/с; зчіпна вага 0,5 – 11кН. Це дозволило отримати критерій оптимізації - тягове зусилля на рівні 1,5 – 3,0 кН .

Встановлено, що потужність зростає при збільшенні швидкості руху: при твердості ґрунту  $H=1,0$  (0,8) МПа та при зростанні швидкості від 2,0 до 3,6 км/год у 1,8 рази. Інтенсивність зростання потужності перевищує інтенсивність зростання швидкості пересування електротрактора в 1,44 рази.

Питома енергоємність оранки ґрунту залежить від швидкості руху електротрактора за лінійним законом: при твердості ґрунту  $H=1,0$  (0,8) МПа при зростанні швидкості від 2,0 до 3,6 км/год питома енергоємність збільшується у 1,2 рази.

Розроблена система керування електротрактором на базі мікроконтролера VEC-500 та запрограмовані режими роботи електротрактора.

Річний економічний ефект від впровадження розробленого електротрактора складає 22,26 тис. грн. при терміні окупності 0,84 року.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дідманідзе О.Н., Іванов С.А., Іволгин В.А. Трактор з комбінованою енергоустановкою // Сільський механізатор. 2008. № 11. С. 6-7
2. Зорін К. Автономний або електричний трактор: бій за майбутнє. URL: <http://www.agbz.ru/articles/avtonomnyiy-ili-elektricheskiy-traktor-srajenie-za-budushee>
3. Електротрактор MOBEL Веб сайт: <https://www.youtube.com/watch?v=2wy6ZdToKiE> (дата звернення:18.03.2021)
4. 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)
5. Загинайлов В. И., Андреев С. А. История развития, состояние и перспективы применения техники в полеводстве. Агроинженерия. 2017. № 6. С. 15-22.
6. 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).
7. HPC Series Brushless DC Motor Controller User Guide URL: <https://www.goldenmotor.com/HPC%20Series%20Controller%20User%20Guide.pdf> (дата звернення: 11.10.2021).
8. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: «Энергия», 1977. 432 с.
9. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. Учеб. для вузов. 2-е изд., испр. М.: Высш. шк., 2000. 255 с.
10. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Электромеханика: учебник для студентов вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 512 с.
11. Ключев В. И. Теория электропривода: учебник для ВУЗов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 704 с

12. Далека В. Х., Пушков П.М., Андрійченко В.П. та ін. Основи електричної тяги: навч. Посібник. Х.: ХНАМГ, 2012. 312 с
13. Хвостов В.С. Электрические машины постоянного тока. М.: Высшая школа, 1988. 336 с.
14. Метельський В.П. Електричні машини та мікромашини. Запоріжжя: ЗНТУ. 2005. 616 с
15. Плаксин А.М. Энергетика мобильных агрегатов в растениеводстве. Челябинск: ЧГАУ, 2005. 204 с.
16. Пушков П.М. Основы электрической тяги: уч. пособие: в 2 ч. Х.: ХГАГХ, 2001. 187 с
17. Ковальов О.В., Куценко Ю.М., Назар`ян Г.Н. Розрахунок потужності та вибір тягового електродвигуна приводу мотоблока. Праці ТДАТУ. 2010. Вип. 10, т.8. С. 228-238.
18. Ковальов О.В. Методика розрахунку та вибору тягового електродвигуна в приводі мотоблока. Вісник ДДАУ. 2010. Вип. 2. С 80-84.
19. Кусов Т.Т. Создание энергетических средств с электромеханическим приводом. Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1988. № 10. С. 12-15.
20. Чиликин М.Г. Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1979. 616 с.
21. Хвостов В.С. Электрические машины постоянного тока. М.: Высшая школа, 1988. 336 с.
22. Ковальов О.В. Комутаційні режими роботи ДПС приводу ґрунтообробного мотоблоку. Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації: матер. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф./ ПереяславХмельницький, 2018. С. 673-675.
23. Ковальов О.В. Обґрунтування оптимального режиму керування тяговим двигуном постійного струму мотоблоку. Праці ТДАТУ. 2011. Вип. 11, т.3. С. 155-164.
24. Гринь Г.С. Полевая диагностика почв. Харьков: ХСХИ, 1974. 222 с.

25. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 343 с
26. Кіт М. Г. Морфологія ґрунтів: навч. посіб. Львів: Вид-во ЛНУ ім. Івана Франка, 2008. 227 с
27. Чигарев Ю.В., Синкевич П.Н. Математические основы механики почв. Минск: УП «Технопринт», 2004. 163 с.
28. Мусин А.М. Техничко-економические показатели мобильных электроагрегатов централизованного электроснабжения и перспектива их разработки. Материалы Всесоюзного научно-методического совещания секции Применения электрической энергии в сельском хозяйстве. Тбилиси, 1981 г.
29. Юхимчук С.Ф. Випробування та сертифікація сільськогосподарської техніки: Навчальний посібник. Луцьк: Ред.-відділ Луцького НТУ, 2017. 136с.
30. Ковальов О.В., Куценко Ю.М., Рубцов М.О. та ін. Оптимізація експлуатаційних показників електромоблоку методом планування експерименту. Праці ТДАТУ. 2011. Вип. 11, т.4. С. 187-200.
31. Ковальов О.В., Назар`ян Г.Н., Куценко Ю.М. Аналітичне визначення оптимальних експлуатаційних показників електрифікованого ґрунтообробного моблоку. Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. 2011. Вип. 116. С. 108-111.
32. Назарян Г.Н. Практический курс планирования эксперимента. Мелитополь: ТДАТА, 1999. 66 с.
33. Мельников С.В., Алешин В.Р., Роцин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.
34. Техника для фермерского хозяйства: моблоки и транспортные средства. Библиотека фермера. М.: Информагротех, 1991. Вып.1.
35. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательская и опытноконструкторских работ. М.: ВНИНПИ, 1983. 149 с.
36. Мусин А.М. Техничко-економические показатели мобильных электроагрегатов централизованного электроснабжения и перспектива их

разработки. Материалы Всесоюзного научно-методического совещания секции Применения электрической энергии в сельском хозяйстве. Тбилиси, 1981 г.

37. Чирков В. Г. Расчеты экономического эффекта новой техники. К.: Техника, 1984. 182 с.

38. Квітка С.О., Ковальов О.В. Обґрунтування системи керування електроприводом ґрунтообробного мотоблоку. Вісник СНАУ. 2016. Вип. 10/1 (29). – С. 183-186.

39. Ковальов О.В., Катюха А.А., Назар'ян Г.Н. Аналітичний метод порівняльної техніко-енергетичної оцінки ефективності і технічного рівня мотоблоків. Праці ТДАТА. 2007. Вип. 7, т.3. С. 93-99

40. Ковальов О.В., Журавель Д.П., Постол Ю.О. та ін. Оцінка ефективності технічного рівня ґрунтообробних мотоблоків. Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine: International 141 scientific and practical conference. (December 21-22, 2018)/ Wloclawek, Republic of Poland, 2018. P.117-120.

41. Kovalov O., Kvitka S., Solomakha O. et al. Development of a Motor Speed Observer for a Electrified Soil-Cultivating Motoblock. Modern Development Paths of Agricultural Production. Trends and Innovations. Springer International Publishing, 2019. P. 365-374. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_38). (

42. Kovalov O., Nazarenko I., Kvitka S. et al. "Electric Drive of Small Sized Soil-Cultivating Motoblock," 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). 2020, pp. 1-4, <https://doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240884>