

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
Міністерство освіти і науки України

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Ковальов Олександр Вікторович

УДК 631.372

ДИСЕРТАЦІЯ

Обґрунтування параметрів і режимів роботи регульованого
електропривода мотоблока

05.09.03 – електротехнічні комплекси і системи

14 – електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



О.В. Ковальов

Науковий керівник: Назаренко Ігор Петрович, доктор технічних наук, професор

Ідентичність усіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ

Учений секретар спеціалізованої вченої ради Д 18.819.01



О.Ю. Вовк

Мелітополь – 2021

АНОТАЦІЯ

Ковальов О.В. Обґрунтування параметрів і режимів роботи регульованого електропривода мотоблока – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи» (14 – електрична інженерія) – Міністерство освіти і науки України «Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного», Мелітополь, 2021.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності технологічного процесу основних видів обробки ґрунту і зменшенню питомих енерговитрат на обробку ґрунту шляхом обґрунтування параметрів і режимів роботи електропривода мотоблока.

В Україні за останні роки значно збільшилася кількість фермерських господарств і приватних землекористувачів. При цьому великий розвиток отримало овочівництво захищеного ґрунту. Для підвищення ефективності виробництва овочів в теплицях і парниках широке застосування отримали малогабаритні мобільні агрегати у вигляді мотоблоків з ДВЗ потужністю 1-7 кВт вітчизняного і зарубіжного виробництва. В цілому мотоблоки з ДВЗ характеризуються як ефективні засоби малої механізації трудомістких процесів і особливо основного процесу обробки ґрунту в фермерських господарствах, на присадибних і дачних ділянках. Однак під час роботи мобільних агрегатів з ДВЗ в теплицях і парниках підвищується рівень шуму і загазованість повітря, які негативно впливають не тільки на людей, але й на рослини. Причина цього - продукти неповного згоряння рідкого палива, які осідаючи на скляну або плівкову поверхню теплиці зменшують їх проникність, як наслідок, це приводить до зниження росту і розвитку рослин. До недоліків мотоблоків з ДВЗ також відносяться досить високі питомі витрати рідкого палива, що має високу вартість, труднощі при пуску і зупинці агрегату, а також відносно невисока надійність ДВЗ.

Більш перспективними для роботи в спорудах захищеного ґрунту є мобільні агрегати з тяговими електродвигунами (ТЕД), що отримали назву електромоблоків, як екологічно чисті агрегати що не мають названих недоліків. Як показали проведені дослідження, заміна ДВЗ на нерегульований електропривод з асинхронним двигуном не дозволяє забезпечити необхідний діапазон регулювання швидкості руху електромоблока, а також високі енергетичні показники його роботи.

Дослідження таких енергетичних засобів обробітку ґрунту є актуальним в південному регіоні України.

Такий стан питання створює **народногосподарську проблему**, суть якої полягає в підвищених питомих витратах енергоресурсів при виконанні основних видів обробітку ґрунту та його низькій техніко-економічній ефективності.

Це приводить до необхідності вирішення **науково-технічної задачі** з підвищення енергоефективності основних видів обробітку ґрунту за рахунок обґрунтування параметрів і режимів роботи електропривода ґрунтообробного мотоблока.

Проведено огляд існуючих конструкцій мотоблоків з двигунами внутрішнього згорання та розглянуто стан питання по мотоблокам та мотокультиваторам з приводом від електродвигунів. Зроблено аналіз способів електроживлення мотоблоків з тяговими електродвигунами. Обґрунтовано використання гнучкого кабелю в сукупності з кабельно-барабанним пристроєм.

На підставі аналізу тягових характеристик та експлуатаційних показників електромоблока визначені параметри регулювання, що впливають на енергетичні та техніко-економічні показники, а також на обґрунтування конструктивного виконання, номінальних даних та параметрів тягового електродвигуна.

Обґрунтовано структурну та електромеханічні схеми енергетичного силового каналу електропривода мотоблока. Це дозволило отримати рівняння балансу потужностей в електроприводі електромоблока та умови отримання максимального коефіцієнту корисної дії приводного електродвигуна.

Розроблено методику розрахунку потужності та вибору тягового електродвигуна привода електромоблока, проведено перевірку двигуна за умовам нагріву та перевантажувальній здатності, а також виконано оцінку потенційно-комутаційних умов на колекторі тягового ДПС.

Обґрунтовано параметри і характеристики регулювання, що визначають режими керування тягового двигуна на основних ділянках зміни кутових швидкостей ДПС послідовного збудження. Отримано алгоритм реалізації закону керування тяговим електродвигуном по максимуму коефіцієнта корисної дії, що дозволяє забезпечити простими і надійними засобами реалізацію заданої тягової характеристики з високими техніко-енергетичними показниками.

Обґрунтовано та розроблено систему керування електродвигуном привода ґрунтообробного електромоблока. Отримано структурно-функційну схему керування та виконано синтез спостережника швидкості обертання електродвигуна приводу моблоку. Проведено дослідження отриманого спостережника швидкості обертання електродвигуна шляхом моделювання в програмі Matlab/Simulink.

Обґрунтовано параметри і режими роботи ґрунтообробного електромоблока. Проведено багатофакторний експеримент. Отримані рівняння регресії дають можливість оцінити вплив параметрів електромоблока на питомі енерговитрати при основних видах обробітку ґрунту.

Проведене теоретичне дослідження та порівняльна техніко-енергетична оцінка моблоків показали високий технічний рівень моблока з електроприводом. Переваги електромоблока – простота конструкції, відсутність шумів та вібрації, значно менші питомі енерговитрати у порівнянні з моблоками з двигунами внутрішнього згорання.

Розроблений експериментальний зразок електромоблока було впроваджено у фермерське господарство «ЄНІСЕЙ-7», (сmt Ботієве, Запорізька область), що підтверджено актами впровадження. Новизна технічного рішення підтверджена патентом України на корисну модель.

Приведено техніко-економічні показники ефективності впровадження електрифікованого ґрунтообробного мотоблока. Річний економічний ефект від впровадження склав 20,1 тис. грн., термін окупності додаткових капітальних вкладень 1,5 року. Викладено загальні висновки і рекомендації.

Ключові слова: обробіток ґрунту, електромоблок, тягова характеристика, система керування, параметри регулювання, тяговий двигун.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. 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. *(Здобувачем обґрунтовано питомі показники мотоблоків)*
2. Ковальов О.В. Енергетичний баланс та закон оптимального керування мотоблоком з тяговим електродвигуном постійного струму. *Праці ТДАТУ*. 2008. Вип. 8, т. 5. С. 138-148.
3. Ковальов О.В. Тягові характеристики та керування мотоблоком з електроприводом по максимуму ККД. *Науковий вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»*. 2008. №30. С. 509-510.
4. Ковальов О.В. Методика розрахунку та вибору тягового електродвигуна в приводі мотоблока. *Вісник ДДАУ*. 2010. Вип. 2. С 80-84.
5. 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. *(Здобувачем обґрунтовано тип та визначена потужність електродвигуна приводу електромоблока)*
6. Ковальов О.В. Обґрунтування оптимального режиму керування тяговим двигуном постійного струму мотоблоку. *Праці ТДАТУ*. 2011. Вип. 11, т.3. С. 155-164.

7. 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. (Здобувачем отримана математична модель області оптимуму параметру оптимізації).

8. Ковальов О.В., Назар`ян Г.Н., Куценко Ю.М. Аналітичне визначення оптимальних експлуатаційних показників електрифікованого ґрунтообробного мотоблоку. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2011. Вип. 116. С. 108-111. (Здобувачем визначено оптимальні експлуатаційні показники електромоблока).

9. Ковальов О.В., Квітка С.О. Обґрунтування способу керування ДПС приводу мотоблоку. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2011. Вип. 175. С. 146-147. (Здобувачем обґрунтовано режими керування електродвигуном проводу електромоблока).

10. Ковальов О.В., Хандола Ю.М. Комутація в ДПС електропривода ґрунтообробного мотоблоку. *Науково-технічний журнал «Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК»*. 2014. Вип. №1 (1). С. 42-44. (Здобувачем визначено потенційно-комутаційні умови на колекторі тягового електродвигуна мотоблока).

11. Квітка С.О., Ковальов О.В. Обґрунтування системи керування електроприводом ґрунтообробного мотоблоку. *Вісник СНАУ*. 2016. Вип. 10/1 (29). – С. 183-186. (Здобувачем розроблено функційну схему керування електродвигуном мотоблока)

12. Назаренко І.П., Ковальов О.В., Герасименко В.П. Енергозберігаюча система обробітку ґрунту на базі електрифікованого мотоблоку. *Збірник наукових праць «Енергетика і автоматика»*. 2018. № 5(39). С. 48-58. (Здобувачем обґрунтовано структурну та електромеханічну схеми електромоблока).

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. 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. (Здобувачем

проведено моделювання спостережника швидкості обертання електродвигуна приводу мотоблока).

14. 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](https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240884). (Здобувачем отримано струмо-часові та механічні характеристики електродвигуна приводу мотоблока).

15. Ковальов О.В. Шляхи реалізації енергозбереження засобами агропромислового електропривода. *Сучасні тенденції та перспективи розвитку збалансованого природокористування в агропромисловому виробництві*: матер. Міжнар. наук.-практ. конф./ Ніжин, 2015. С. 217-221.

16. Ковальов О.В. Енергозберігаюча система обробітку ґрунту на базі електрифікованого малогабаритного ґрунтообробного мотоблоку. *Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК півдня України»*/ Мелітополь, 2015. С. 112-113

17. Ковальов О.В., Гулевський В.Б. Електротехнологічна система обробітку ґрунту на базі малогабаритного ґрунтообробного мотоблоку. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)*: матер. Міжнар. наук.-техн. конф./ НУБіП. Київ, 2016. С. 21-23. (Здобувачем обґрунтовано структурну схему силового енергетичного каналу електромоблока).

18. Ковалев А.В. Обоснование способа электропитания мотоблока с тяговым электродвигателем. *Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК*: матер. Междунар. науч.-техн. конф./ БГАТУ. Минск, 2017. С. 50-52.

19. Ковальов О.В., Постнікова М.В. Енергозберігаюча система обробітку ґрунту на базі електрифікованого мотоблоку. *Соціально-економічний розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення*: мат. міжнар. наук.-практ. конф./ ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут», 2018. С. 356-357. (Здобувачем отримано рівняння балансу потужностей електромоблока).

20. 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 scientific and practical conference. (December 21-22, 2018)/ Wloclawek, Republic of Poland, 2018. P.117-120. (Здобувачем проведено розрахунки сумарного інтегрального коефіцієнта ефективності мотоблоків)*

21. 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./ Переяслав-Хмельницький, 2018. С. 673-675.*

22. Ковальов О.В. Режими роботи електродвигуна приводу ґрунтообробного мотоблоку. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта: Мат. VII Міжнар. наук.-техн. конф. /НУБіП України. Київ, 2018. С. 96-98.*

Праці, які додатково відображають результати дисертації

23. Ґрунтообробний мотоблок: пат. на кор. мод. 35352, Україна, МПК (2006, 51) В60К1/008. № и 200805379. Опубл. 10.09.2008 р., Бюл. №17. *(Здобувачем отримано формулу винаходу, обґрунтовано схему пристрою керування).*

SUMMARY

Kovalov O.V. Justification of the parameters and operating modes of the regulated electric drive of the motoblock - Qualifying scientific work as a manuscript.

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 - "Electrotechnical complexes and systems" (14 - electric engineering). - The Ministry of Education and Science of Ukraine - the Tavriya State Agrotechnological University Name for Dmitry Motorny, Melitopol, 2021.

The dissertation work is devoted to increase of efficiency of technological process of the basic kinds of soil cultivation and reduction of specific energy consumption for soil cultivation by substantiation of parameters and operating modes of the electric drive of the motoblock.

In Ukraine, the number of farms and private land users has increased significantly in recent years. At the same time, vegetable growing of protected soil was greatly developed. To increase the efficiency of vegetable production in greenhouses and hotbeds, small-sized mobile units in the form of motoblocks with internal combustion engines with a capacity of 1-7 kW of domestic and foreign production have been widely used. In general, motoblocks with internal combustion engines are characterized as effective means of small mechanization of labor-intensive processes and especially the main process of tillage in farms, homesteads and cottages. However, during the operation of mobile units with internal combustion engines in greenhouses and hotbeds, the noise level and air pollution increase, which negatively affect not only people but also plants. The reason for this is the products of incomplete combustion of liquid fuel, which by settling on the glass or film surface of the greenhouse reduce their permeability, as a consequence, it leads to a decrease in plant growth and development. The disadvantages of motoblocks with internal combustion engines also include quite high specific losses of liquid fuel, which has a high cost, difficulties in starting and stopping the unit, as well as the relatively low reliability of the internal combustion engine.

More promising for work in protected soil structures are mobile units with traction motors (TED), called electric motors, as environmentally friendly units that do not have these shortcomings. Studies have shown that the replacement of the internal combustion engine with an unregulated electric drive with an induction motor does not allow to provide the necessary range of speed control of the electric motor unit, as well as high energy performance. Research of such energy means of tillage is relevant in the southern region of Ukraine.

The review of the existing designs of motoblocks with internal combustion engines is carried out and the state of the issue on motoblocks and motor cultivators driven by electric motors is considered. The analysis of methods of power supply of motoblocks with traction electric motors is made. The use of a flexible cable in combination with a cable-drum device is substantiated.

Based on the analysis of traction characteristics and performance of the electric motor unit, the control parameters that affect the energy and technical and

economic indicators, as well as the justification of design, nominal data and parameters of the traction motor are determined.

The structural and electromechanical schemes of the energy power channel of the electric drive of the motoblock are substantiated. This allowed to obtain the equation of power balance in the electric drive of the electric motor unit and the conditions for obtaining the maximum efficiency of the drive motor.

A method for calculating the power and selection of the traction motor of the electric motor unit drive has been developed, the engine has been tested for heating and overload conditions, and the assessment of potential switching conditions on the traction engine collector has been performed. The parameters and characteristics of regulation that determine the control modes of the traction engine in the main areas of change of angular velocities of the traffic police of parallel, mixed and sequential excitation are substantiated. The algorithm of realization of the law of control of the traction electric motor on a maximum of efficiency is allowed that allows to provide simple and reliable means of realization of the set traction characteristic with high technical and power indicators.

The control system of the electric motor of the drive of the tillage electric motor unit is substantiated and developed. The structural and functional control scheme is obtained and the synthesis of the motor unit drive motor speed observer is synthesized. The obtained observer of the speed of rotation of the electric motor by simulation in the program Matlab / Simulink is carried out.

The parameters and modes of operation of the tillage electric motor unit are substantiated. A multifactorial experiment was performed. The obtained regression equations make it possible to estimate the influence of the parameters of the electric motor unit on the specific energy consumption for the main types of tillage.

The conducted theoretical research and comparative technical and energy evaluation of motoblocks showed a high technical level of the motoblock with electric drive. Advantages of the electric motor-block - simplicity of a design, absence of noise and vibration, much smaller specific energy consumption in comparison with motor-blocks with internal combustion engines.

The developed experimental sample of the electric motor unit was introduced into the farm "YENISEY-7" (Botieve village, Zaporizhia region), which is confirmed by the acts of implementation. The novelty of the technical solution is confirmed by the patent of Ukraine for a utility model.

The technical and economic indicators of efficiency of introduction of the electrified tillage motoblock are resulted. The annual economic effect of the implementation amounted to 20,1 thousand UAH, the payback period of additional capital investments is 1,5 years. General conclusions and recommendations are stated.

Key words: tillage, electrified motoblock, traction characteristic, control system, regulation parameters, traction engine.

ЗМІСТ

ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	22
1.1 Аналіз малогабаритних ґрунтообробних машин з двигунами внутрішнього згорання	22
1.2 Аналіз мотоблоків та культиваторів з електроприводом	25
1.3 Аналіз способів електроживлення мотоблоків з електроприводом	30
1.4 Аналіз стану питання з розробки електроприводів мобільних енергетичних засобів	35
1.5 Висновки за розділом та постановка задач досліджень	36
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ОБҐРУНТУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМОТОБЛОКА	37
2.1 Аналіз тягових характеристик і параметрів регулювання електромоблока	37
2.2 Обґрунтування структури силового енергетичного каналу електромоблока	45
2.3 Розробка методики розрахунку потужності і вибір тягового електродвигуна мотоблока	53
2.3.1 Вибір тягового електродвигуна за родом струму	55
2.3.2 Розрахунок потужності і вибір тягового ДПС	56
2.3.3 Вибір передавального відношення редуктора	60
2.3.4 Перевірка тягового електродвигуна привода електромоблока	61
2.4 Оцінка потенційно-комутаційних умов на колекторі тягового ДПС привода електромоблока	64

2.5 Теоретичні дослідження характеристик регулювання тягового електродвигуна	68
2.6 Аналіз режимів керування тягового електродвигуна постійного струму електромоблока	74
2.7 Розрахунок часткових характеристик регулювання ТЕД електромоблока	76
2.8 Обґрунтування оптимального режиму керування тяговим ДПС електромоблока по максимуму ККД	81
2.9 Теоретичні дослідження спостережника швидкості двигуна постійного струму привода моблока	88
2.10 Висновки за розділом 2	95
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	97
3.1 Програма лабораторних та польових досліджень	97
3.2 Методика лабораторних дослідження системи керування електродвигуном привода електромоблока	97
3.3 Методика визначення раціональних параметрів електромоблока	101
3.4 Методика проведення польових досліджень електромоблока	106
3.4.1 Методика визначення твердості ґрунту	106
3.4.2 Методика визначення вологості ґрунту	107
3.4.3 Методика енергетичної оцінки роботи електромоблока	108
3.5 Висновки за розділом 3	110
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	111
4.1 Аналіз результатів лабораторних дослідження системи керування електродвигуном привода електромоблока	111
4.2 Аналіз результатів визначення раціональних параметрів електромоблока	112

4.3 Аналіз результатів польових досліджень електромоблока	118
4.4 Висновки за розділом 4	124
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА	125
5.1 Порівняльна оцінка технічного рівня мотоблоків	125
5.2 Визначення економічної ефективності електромоблока	128
5.3 Висновки за розділом	132
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	133
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	135
ДОДАТКИ	150
Додаток А	150
Додаток Б	152
Додаток В	154
Додаток Г	156
Додаток Д	158

ВСТУП

Актуальність теми. За останнє десятиріччя в Україні значно збільшилась кількість фермерських господарств і приватних землекористувачів. При цьому великий розвиток отримало овочівництво захищеного ґрунту. Для підвищення ефективності виробництва овочів в теплицях і парниках широке застосування отримали малогабаритні мобільні агрегати у вигляді мотоблоків з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ) потужністю 1-7 кВт вітчизняного і зарубіжного виробництва. В цілому мотоблоки з ДВЗ характеризуються як ефективні засоби малої механізації трудомістких процесів і особливо процесу основного обробітку ґрунту в фермерських господарствах, на присадибних і дачних ділянках. Однак під час роботи мобільних агрегатів з ДВЗ в теплицях і парниках підвищується рівень шуму і загазованість повітря, які негативно впливають не тільки на людей, але і на рослини. Причина цього - продукти неповного згорання рідкого палива, які осідаючи на скляну або плівкову поверхню теплиці зменшують їх світлопроникність, як наслідок, це приводить до зниження росту і розвитку рослин. До недоліків мотоблоків з ДВЗ також відносяться досить високі питомі втрати рідкого палива, що має високу вартість, труднощі при пуску і зупинці агрегату, а також невисока надійність ДВЗ.

Більш перспективними для роботи в спорудах захищеного ґрунту є мобільні агрегати з тяговими електродвигунами (ТЕД), що отримали назву електромотоблоків, як екологічно чисті агрегати, що не мають зазначених недоліків. Заміна ДВЗ на нерегульований електропривод з асинхронним двигуном не дозволяє забезпечити необхідний діапазон регулювання швидкості руху електромотоблока, а також високі енергетичні показники його роботи.

Дослідження таких енергетичних засобів обробітку ґрунту є актуальним на всій території України.

Такий стан питання створює **народногосподарську проблему**, суть якої полягає в підвищених питомих витратах енергоресурсів при виконанні основних видів обробітку ґрунту та його низькій техніко-економічній ефективності.

Це приводить до необхідності вирішення **науково-технічної задачі** з підвищення енергоефективності основних видів обробітку ґрунту за рахунок обґрунтування параметрів і режимів роботи електропривода ґрунтообробного мотоблока.

Зв'язок роботи з науковими програмами.

Дослідження виконувались в Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного.

Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетів державної науково-технічної програми (ДНТП 3.12) «Енерго- та ресурсозберігаючі технології в сільськогосподарському виробництві», плану науково-дослідної роботи Таврійського державного агротехнологічного університету на 2005-2010 роки по науково-технічній програмі №1 «Розробка наукових основ, систем технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України» (підпрограма 1.8 «Розробка електрифікованих машин и установок для фермерських господарств» державний реєстраційний номер 0107U2008953, розділ 1.8.1 «Розробка електрифікованих малогабаритних кормоприготувальних та ґрунтообробних машин з оптимізацією енергетичних витрат»), програмі №1 на 2011-2015 роки «Розробка наукових основ, систем технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України» підпрограма 1.14 «Розробка електромеханічних систем технологічних процесів сільськогосподарського виробництва», державний реєстраційний номер 0111U2002556, розділ 1.14.1 «Розробка електромеханічної системи обробітку ґрунту на основі мобільних електрифікованих машин», програмі №5 на 2016-2020 роки «Ресурсоенергозберігаючі режими передачі і перетворення енергії в агропромисловому комплексі», державний реєстраційний номер 0116U002726, тема 5.1 «Ресурсоенергозберігаючі експлуатаційні режими роботи силового електрообладнання, енергозберігаючі біотехнічні системи», розділ 5.1.3 «Розробка та удосконалення енергозберігаючої електромеханічної системи обробітку ґрунту».

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення енергоефективності електропривода ґрунтообробного мотоблока за рахунок оптимізації його електричних параметрів і режимів роботи.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій електрифікованих малогабаритних ґрунтообробних мотоблоків та способів їх електроживлення.
2. Провести оптимізацію потужності, маси і лінійної швидкості електромотоблока з урахування критерію оптимізації – тягового зусилля мотоблока.
3. Дослідити характеристики регулювання та обґрунтувати режими керування тяговим електродвигуном мотоблока.
4. Обґрунтувати систему керування тягового електродвигуна мотоблока.
5. Провести порівняльну техніко-енергетичну та техніко-економічну оцінку роботи електромотоблока.

Об'єкт дослідження - процеси електромеханічного перетворення енергії в електроприводі мотоблока при обробітку ґрунту.

Предмет дослідження - закономірності зміни параметрів та режимів роботи електропривода мотоблока, що характеризують технологічний процес обробітку ґрунту.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених у роботі задач теоретичні дослідження проводились з використанням основних положень вищої математики та математичної фізики, теорії електричних машин, теорії електропривода, теорії імовірностей і математичної статистики, теорії комутаційних порушень на колекторі, метода порівняльної техніко-енергетичної оцінки технічного рівня технологічного обладнання. Експериментальні дослідження проводилися на спеціально розробленому експериментальному зразку електромотоблока з використанням промислового технічного обладнання та засобів вимірювань.

Для розрахунків, обробки даних і побудови графічних залежностей було використано пакет прикладних програм для ПЕОМ «Microsoft Office Excel», «MATLAB 6,5» і «MAPLE».

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше отримано теоретичні та експериментальні залежності корисної потужності тягового двигуна привода електромоблока від лінійної швидкості, в яких на відміну від існуючих враховано вид ґрунту, що обробляється;

- отримані раніше невідомі умови і характеристики оптимальних режимів керування тяговим електродвигуном електромоблока за максимумом ККД на основних інтервалах зміни швидкості, в яких на відміну від існуючих враховано всі види втрат в тяговому електродвигуні;

- вперше отримані оптимальні значення експлуатаційних показників електромоблока на підставі розробленої математичної моделі тягового зусилля.

Достовірність отриманих результатів підтверджується збігом результатів аналітичних досліджень автора з результатами, отриманими шляхом математичного і польового досліджень електромоблока з приводом від двигуна постійного струму послідовного збудження.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Запропоновано методику розрахунку потужності і вибору тягового електродвигуна для приводу електромоблока. Для практичного вибору потужності ТЕД в роботі наведені графіки корисної потужності ТЕД при оранці важких, середніх і легких ґрунтів.

2. Для практичного застосування розроблені алгоритми реалізації оптимальних режимів керування тяговим електродвигуном постійного струму електромоблока, що забезпечують необхідний закон регулювання при незмінній споживаній потужності двигуном з мережі.

3. Отримані шляхом багатофакторного експерименту рівняння регресії дозволяють визначити вплив параметрів та режимів роботи електромоблока на якість обробки ґрунту та можуть бути використані при моделюванні і конструюванні малогабаритних ґрунтообробних машин.

4. Визначено гранично-допустимі показники комутаційних умов на колекторі тягового електродвигуна постійного струму електромоблока.

5. Згідно договорів про творчу співпрацю та актів впровадження від 2017-2020 років, представники агрофірми «ЄНІСЕЙ-7» засвідчують зниження питомих енерговитрат при обробітку ґрунту на 10-12% при дотриманні агротехнічних вимог.

6. Техніко-економічні розрахунки впровадження електромоторного блоку показали річний економічний ефект 20,1 тис. грн., термін окупності додаткових капітальних вкладень склав 1,5 року.

Особистий внесок здобувача.

Основні результати автором отримані самостійно. У дисертації особисто автором розроблена методика розрахунку потужності і вибору типу тягового електродвигуна електромоторного блоку, проведено конструювання та виготовлення дослідного зразка електромоторного блоку з тяговим електродвигуном, а також обґрунтовано параметри керування тяговим електродвигуном моторного блоку по максимуму ККД.

У наукових роботах написаних у співавторстві, внесок здобувача полягає в наступному: обґрунтовано і розраховано показники, необхідні для порівняльної оцінки технічного рівня сучасних моторних блоків з електродвигунами і двигунами внутрішнього згорання [60, 62]; обґрунтовано тип та визначено потужність електродвигуна привода електромоторного блоку [61, 64, 92]; отримана математична модель області оптимуму та визначені оптимальні експлуатаційні показники електромоторного блоку [65, 66]; визначено потенційно-комутаційні умови на колекторі тягового електродвигуна електромоторного блоку [68]; отримано струмо-часові та механічні характеристики електродвигуна привода моторного блоку [145]; обґрунтовано режими керування та проведено моделювання спостережника швидкості двигуна привода електромоторного блоку [30, 48, 67, 144].

Дослідження проводилися в лабораторії електричних машин ТДАТУ імені Дмитра Моторного і фермерському господарстві «ЄНІСЕЙ-7», смт Ботієве Мелітопольського району Запорізької області.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи заслуховувалися і отримали позитивну оцінку на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів і студентів (м. Мелітополь, ТДАТУ, 2005-2020 р.р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харків, ХДУСГ, 2007 р.); XV міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика», Харків, НТУ ХПІ (АР Крим, 2008 р.); Науково-технічній конференції «Проблеми механізації та енергозбереження в агропромислова комплексі» (м. Дніпро, ДДАУ, 2010 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Моделювання технологічних процесів в АПК», (м. Мелітополь, ТДАТУ, 2010 р.); Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Задачі землеробської механіки у XXI сторіччі» приуроченій 75-річчю Кушнарєва А.С., (Мелітополь, 2010 р.); науково-технічній конференції «Проблеми механізації та енергозбереження в агропромисловому комплексі», (м. Дніпро, ДДАУ, 2011 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні питання енергетики и прикладної біофізики в агровиробництві» ЕТБФ - 2011, (м. Мелітополь, ТДАТУ, 2011 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», (м. Харків, ХДУСГ, 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енергозберігаючі технології», ФГБОУ ВПО МДАУ, (Росія, м. Москва, 8-9 листопада 2012 року); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК півдня України», (м. Мелітополь, ТДАТУ, березень 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції до 60-річчя заснування енергетичного факультету «Проблеми енергетики и прикладної біофізики в АПК», (м. Мелітополь, ТДАТУ, 13-14 червня 2013 р.), VI міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій пам'яті академіка І.І. Мартиненко - Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України, (м. Мелітополь, ТДАТУ, 2015 г.), Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК

України», (м. Харків, ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 3-4 листопада 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК», (м. Мінськ, БГАТУ, 23-24 листопада 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Соціально-економічний розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення» (м. Бережани, ВП НУБіП «БАТІ», 19-20 квітня 2018 р.), VII Міжнародній науково-технічній конференції присвяченої 120-річчю НУБіП України «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування» (м. Київ, НУБіП, 23-27 травня 2018 р.); International Research and Practice Conference «Modern development pathes of agricultural production: trends and innovations» (Melitopol, TSATU, 23-24 October 2018), International scientific and practical conference «Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine» (Wloclawek, Republic of Poland, December 21-22, 2018); Міжнародній науково-практичній конференція «Актуальні питання розвитку аграрної науки в Україні» (м. Ніжин, ВП НУБіП «Ніжинський агротехнічний інститут», 11 квітня 2019 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції пам'яті І.І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів», (м. Мелітополь, ТДАТУ, 13-14 червня 2019 р.); Міжнародному науково-практичному форумі «Сучасні наукові дослідження на шляху євроінтеграції» (м. Мелітополь, ТДАТУ, 21-22 червня 2019 р.); 11th International Scientific and Practical Internet Conference «Modern Movement of Science» (Dnipro, October 8-9, 2020); XXV-th IEEE International Conference “Problems of automated electric drive. Theory and practice” (Kremenchuk, Mykhailo Ostrohradskyi National University, September 21-25, 2020).

Публікації. Основні результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковані в 23 роботах за період з 2007 по 2020 р., у тому числі в 12 фахових статтях, із них 5 одноосібно, 2 статтях, що мають цитування у наукометричній базі Scopus, 1 патенті на корисну модель (Україна).

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота містить вступ, 5 розділів, загальні висновки, список літератури з 155 найменувань та додатків. Містить 160 сторінок, 15 таблиць, 35 рисунків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз малогабаритних ґрунтообробних машин з двигунами внутрішнього згорання

Розвиток в Україні фермерських господарств і приватного землекористування зумовив масове виробництво мобільних енергетичних засобів малої механізації у вигляді міні-тракторів, мотоблоків, мотокультиваторів з двигунами внутрішнього згорання. В країнах далекого зарубіжжя з найбільш розвинутою економікою промислове виробництво мотоблоків та інших засобів малої механізації для фермерів було налагоджено ще в кінці минулого століття [13,113,118].

В даний час номенклатура мобільних агрегатів з двигунами внутрішнього згорання запропонованих на ринку сільськогосподарської техніки, відрізняється великим різноманіттям за призначенням, потужністю, конструктивним виконанням і вартістю.

Технічна характеристика мотоблоків і мотокультиваторів з двигунами внутрішнього згорання виробництва різних країн, які отримали найбільше поширення в Україні, наведена в таблиці 1.1, яка складена на основі каталогів, випусків оглядової інформації видавництвом Інформагротех, періодичних видань сільськогосподарського профілю та мережі Інтернет [36,86,103,112, 129]. При цьому слід зазначити практично повну відсутність публікацій з питань теорії, обґрунтованого вибору двигунів, конструювання та виробництва мобільних агрегатів. Пояснюється це тією обставиною, що як правило розробниками і виробниками мотоблоків і мотокультиваторів є заводи, виробничі об'єднання і фірми з великим досвідом виробництва тракторів, культиваторів та іншої сільськогосподарської техніки.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики найбільш поширених в Україні моделей мотоблоків вітчизняного і іноземного виробництва

Марка мотоблока	Потужність двигуна, кВт	Число передач (вперед/назад)	Діапазон швидкостей руху, км / год.	Коля, мм	Дорожній просвіт, мм	Маса, кг
«Беларусь» МТЗ-012	8,1	4/2	2,15...9.6	450; 600; 700	300	145
ЗДК-4-905	8,1	4/4	3,0...9,4	530...1100	260	130
МБВ-1	7,0	4/2	2,15...9,5	450; 600; 700	300	135
Т1-06	4,8	4/4	1,37...13,0	600...780	305	150
«Кутаиси»	4,4	3/1	1,42...6.0	310...460	180	90
«Беларусь» МТЗ-05	4,1	4/2	2,15...9,6	450; 600; 700	300	135
МБ-90	3,7...4,0	4/4	1,13...10,74	460; 800	200; 300	120
«Каскад-6981»	4	6/2	2,2...12,0	350; 450; 600	140	107
«Каскад-6842»	4	2/2	2,5...10,0	-	140	103
«МБ-1»	3,7...4,0	2/2	2,5...10,0	310	140	90...100
МБ-2 «Нева»	4,0	2/2	1,8...12,0	320	140	86
«Садко»	4...5	4/2	1,2...10,8	400; 520	145	95...100
МИК-2	4	3/1	2,9...9,8	350; 530	160	95
МТ-5	3,7...4,0	2/1	2,5...9,2	350; 620	-	100
«Артания»	4	3/1	1,3...8,7	340; 380; 400; 420	160	85
«Салют»	2,2	4/2	1,32...12,0	360; 600	-	80
М-3	2,3	2	3,3...11,0	350	135	65
«Січ-Д»	4,4	2/1	5,0...10,0	320	140	140
Супер-610А	4,4	3/1	1.42...6,0	332...480	160	90



Рисунок 1.1 – Мотоблок МБ-1



Рисунок 1.2 - Мотоблок М-3

Мотоблоки і мотокультиватори з ДВЗ характеризуються експлуатаційною потужністю (кВт), питомою витратою палива (л./год.), шириною і глибиною обробки ґрунту, числом передач, масою та іншими показниками. За величиною потужності двигуна мотоблоки поділяються на три класи: легкі з потужністю до 3 кВт, середні - до 5 кВт і важкі - до 11 кВт. Важливою характеристикою мотоблоків є компоновка основних елементів конструкції і складу комплектуючого обладнання для обробки ґрунту і рослин (плуг, оқунчик, борона, фреза, картоплекопач і т.і. На рис. 1.1 і 1.2 представлений загальний вид мотоблоків з ДВЗ марки МБ-1 (Росія) і М-3 (Україна) [71].

Головним критерієм при виборі мобільних агрегатів є функціональність, зручність обслуговування, економічність в роботі, безпека в експлуатації і вартість.

Функціональність - це співвідношення фізичних можливостей того чи іншого агрегату виконувати завдання і потреби землеробів, тобто необхідно знати призначення агрегату, які види робіт і наскільки якісно він виконує, яким додатковим обладнанням він може бути оснащений, відповідність його

продуктивності обсягом передбачуваних робіт, і яке навісне обладнання необхідно використовувати для роботи на фермі або присадибний ділянці.

1.2 Аналіз мотоблоків та культиваторів з електроприводом

З літературних видань, що мають пряме відношення до питань, що розглядаються в даній роботі слід відзначити роботи [1-4, 16, 75, 108, 115-117]. В роботі [81] розглянуті питання теорії і практики тягового електропривода автомобілів, що мають теплоелектричні енергоустановки. Наведено методики визначення масогабаритних, енергетичних і інших показників тягових електричних машин змінного і постійного струму. Систематизовані способи реалізації законів регулювання тягових електродвигунів. Велику увагу приділено оптимізації параметрів тягових електричних машин і вентильних перетворювачів, методам розрахунку параметричних залежності тягових асинхронних двигунів і вентильних перетворювачів, обґрунтовані критерії оптимальності. Обґрунтовано спосіб керування двигунами постійного струму за мінімальними втратами.

В роботах [12, 15, 29, 35, 38, 69, 72] розглянуті питання теорії і проектування електричних трансмісій постійного і змінного струму для пневмоколісних транспортних засобів з автономним джерелом енергії. Викладена методика розрахунку характеристик регулювання генераторів і двигунів мотор-колес в тяговому і гальмівному режимах. Особлива увага приділяється частотному керуванню тяговими асинхронними двигунами. Розглянуто принципи побудови систем автоматичного регулювання електричних трансмісій [12, 77-79, 88, 94, 97-99].

З публікацій, присвячених випробуванню мотоблоків з двигунами внутрішнього згорання і тяговими електродвигунами заслуговує увагу робота [77], в якій наведено результати системних випробувань багатоцільових мотоблоків з ДВЗ марок МБ-1; МТЗ-0,5; Супер-610 і ін. Випробування

проводилися на науково-експериментальній базі НВО ВІСХОМ (Росія) в тому числі і при роботі з приводом від асинхронного електродвигуна.

Випробування показали, що завдяки застосуванню металевих коліс зі шпорами замість гумових коліс, тягово-зчіпні властивості мотоблоків поліпшуються більш ніж в два рази. Встановлено, що тягово-зчіпні властивості мотоблоків МТЗ-0,5; МБ-1 і «Супер-610» з гумовими шинами 5,9x18 і 4x10 недостатні для виконання енергоємних технологічних операцій: оранки ґрунту, підгортання і викопування картоплі. Для оцінки ефективності роботи мотоблоків з тяговим електродвигуном були проведені випробування з використанням шасі мотоблоків КМП-1 і МТЗ-0,5. Потужність тягового електродвигуна мотоблока визначається з умови роботи орного агрегату на рекомендованих швидкостях для важких, середніх і легких ґрунтів [77].

Представляють практичний інтерес результати і корисні рекомендації, що містяться в роботі [71], присвяченій дослідженню мотоблоків з тяговими електродвигунами змінного і постійного струму, які проводилися в ІМЕСГ УААН (Україна). У роботі відзначається, що заміна в мотоблоках ДВЗ регульованим електроприводом дозволяє виключити використання коробки передач і тим самим знизити його собівартість і значно підвищити маневреність і надійність в роботі. На основі проведених досліджень встановлено, що момент опору на валу тягового двигуна при оранці ґрунту відрізняється нестабільністю і змінюється на рівному полі на 40...50%. Крім того, спостерігаються періодичні коливання моменту опору з амплітудою 20% від середнього значення, а їх період змінюється від 0,2 до 2,0 с. Для обґрунтування вимог до електроприводу мобільних агрегатів необхідно знати дійсні інтервали оптимальних швидкостей на відповідних сільськогосподарських операціях. Виходячи з цього, комплектуються агрегати, встановлюються допустимі інтервали робочих швидкостей і визначається діапазон регулювання швидкості. На підставі багатьох досліджень і використовуючи дані технічної літератури, автори зазначають три чітко виражених інтервали зміни швидкостей: на основних роботах - 2,2:1; додаткових - 2,7:1 і транспортних - 3,2:1. При дослідженні

впливу періодичних змін моменту на роботу тягового електродвигуна встановлено, що при перевантаженнях двигун працює на деякій перехідною механічної характеристиці з великим нахилом до осі моментів [71].

Порівняльні дослідження в якості тягових асинхронних двигунів з короткозамкненим та фазним ротором (рис. 1.3), а також двигунів постійного струму з незалежним і послідовним збудженням на базі шасі мотоблока «Січ-Д» показали, що найбільш повно відповідає вимогам, що пред'являються до тяговим двигунам в приводі мотоблока є двигун постійного струму послідовного збудження. При цьому наголошується, що ні трифазний асинхронний двигун, ні двигун з фазним ротором не задовольняють основним вимогам, що пред'являються до тяговим двигунам, оскільки вони не забезпечують безступінчасте регулювання швидкості з постійною потужністю, споживаною в зоні робочих швидкостей [71].

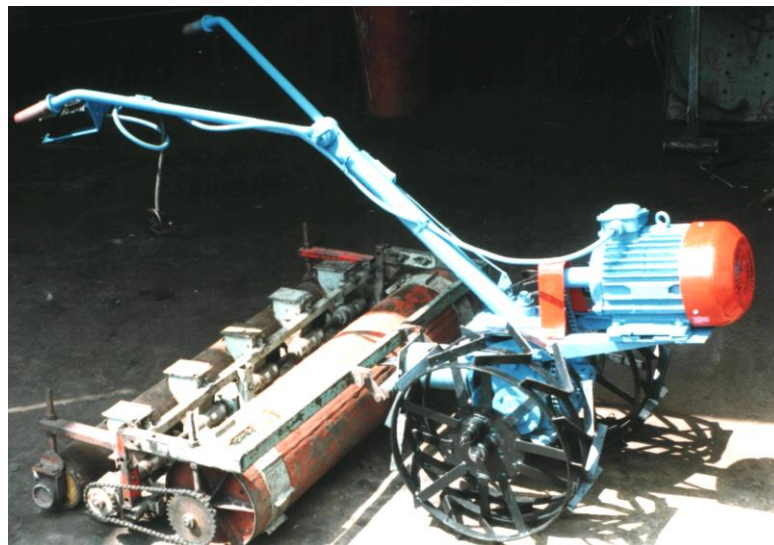


Рисунок 1.3 - Електрифікований мотоблок з приводом від асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

За останні роки деякі підприємства розпочали виробництво електрокультиваторів і електромотоблоків з приводними асинхронними двигунами [130].

Мотокультиватор «Надія». Технічна характеристика: двигун асинхронний конденсаторний; потужність - 1,1 кВт; частота обертання - 1500 об/хв.; живлення від однофазної мережі 220 В, 50 Гц; 1 швидкість вперед; глибина обробки - до 250 мм; ширина обробки - 350-650 мм; розміри: 850x700x1500 мм; маса - 45 кг. У комплекті фреза, кабель 50 м, опорне колесо і активний окучник. Основні операції: суцільне і міжрядне розпушування ґрунту, нарізка борозн і гребнів, підгортання просяпних культур. Електрокультиватор «Надія» - екологічно чистий агрегат, має низький рівень шуму і вібрації, простий по конструкції і обслуговуванню, надійний в роботі.

В Росії також налагоджений випуск електрокультиваторів «Бджола», «ІРП» ЕК-2, ЕК-3 «Кріт» і «Жук» з однофазними асинхронними двигунами потужністю відповідно 1,5; 1,6; 2,2 і 1,1 кВт.

Електрокультиватори ЕІ-Тех 1000 і ЕІ-Тех 1300 (Данія) призначені для розпушування ґрунту і перемішування внесених добавок (торф, компост, добрива) із ґрунтом. Вони ефективно виконують підготовчі роботи для розпушування грядок перед посадкою, обробки пристовбурних кіл, підготовки ґрунту до зими і роботами в важкодоступних місцях (клумби, теплиці). Легко розбираються і збираються, що зручно для транспортування і зберігання.

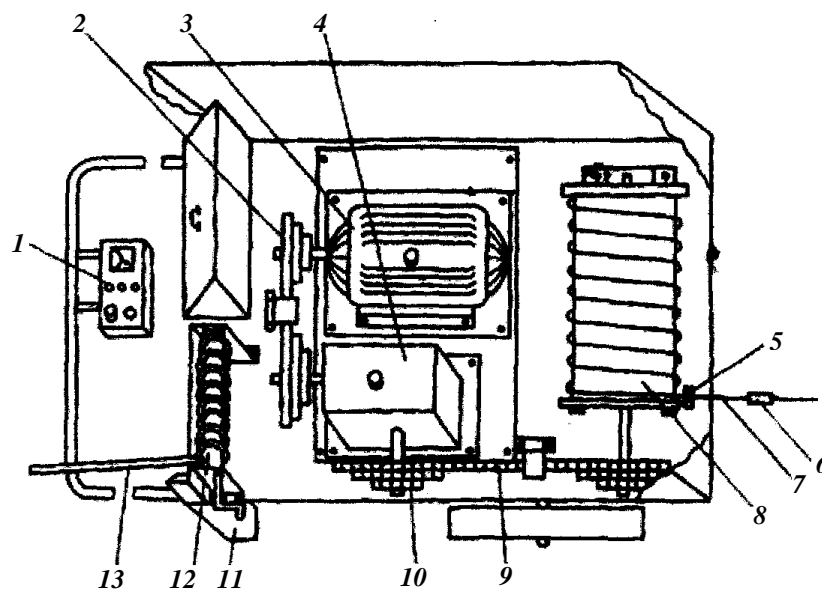
Технічна характеристика: двигун асинхронний потужністю 1,0 кВт (ЕІ-Тех 1000) і 1,3 кВт (ЕІ-Тех 1300); редуктор - черв'ячний; передача - одна вперед; ширина захвату - 28 см; глибина обробки - 20 см; маса ЕІ-Тех 1000 - 10 кг; ЕІ-Тех 1300 - 14 кг.

Мотокультиватори GARDENA ЕН 600/20 і GARDENA ЕН 600/36 призначені для розпушування ґрунту з великими шматками або кіркою, а також для внесення добрив, торфу і компосту в ґрунт. Легкий і зручний в експлуатації. Безпека в роботі забезпечується за допомогою блокування проти самовключення, надійне кабельне з'єднання за допомогою механізму протягання кабелю і штекерного роз'єму.

Технічна характеристика: двигун асинхронний конденсаторний; потужність - 600 Вт; живлення від однофазної мережі 220 В, 50 Гц; робоча частота обертання - 230 об./хв., глибина обробітку ґрунту - до 18 см, ширина захвату ЕН 600/20 - 20 см., ЕН 600/36 - 36 см., число передач - одна вперед; редуктор - черв'ячна; маса - ЕН 600/20 - 6,5 кг, ЕН 600/36 - 8 кг.

Універсальний мотоблок (рис. 1.4). Електродвигун - однофазний асинхронний. На валу двигуна (3) і первинному валу редуктора (4) встановлений блок шківів (5), а на вихідному валу редуктора і валу барабана (8) лебідки - комплект зірочок (10), які дозволяють забезпечити необхідну швидкість обертання і момент на валу різних засобів малої механізації. Всі вузли і механізми змонтовані на візку.

Електромоблок може забезпечувати привід різних засобів малої механізації: січкарні, коренерізки, циркулярні пилки, деревообробний верстат. За допомогою лебідки можна піднімати вантажі, а також переміщати однокорпусний плуг або культиватор. Електродвигун включається в мережу тільки після закріплення візка спеціальними лопатками-фіксаторами, які заглиблюються в ґрунт.



1 - пульт керування; 2 - шківів; 3 - електродвигун; 4 - редуктор; 5 - кінцевий вимикач; 6 - упор; 7 - канат; 8 - барабан лебідки; 9 - ланцюгова передача; 10 - зірочки; 11 - гальмівний упор; 12 - барабан; 13 - кабель.

Рисунок 1.4 - Конструкція універсального електромоблока

Електромотоблок забезпечує обробку присадибної ділянки, та завдяки значному тяговому зусиллю дозволяє обробляти як піщані, так і чорноземні ґрунти, в тому числі і на схилах. При роботі включається електродвигун і на барабан намотується трос, на якому закріплюються плуг, культиватор або окучник. Універсальний електромотоблок екологічно чистий, простий в керуванні і надійний в експлуатації [80].

1.3 Аналіз способів електроживлення мотоблоків з електроприводом

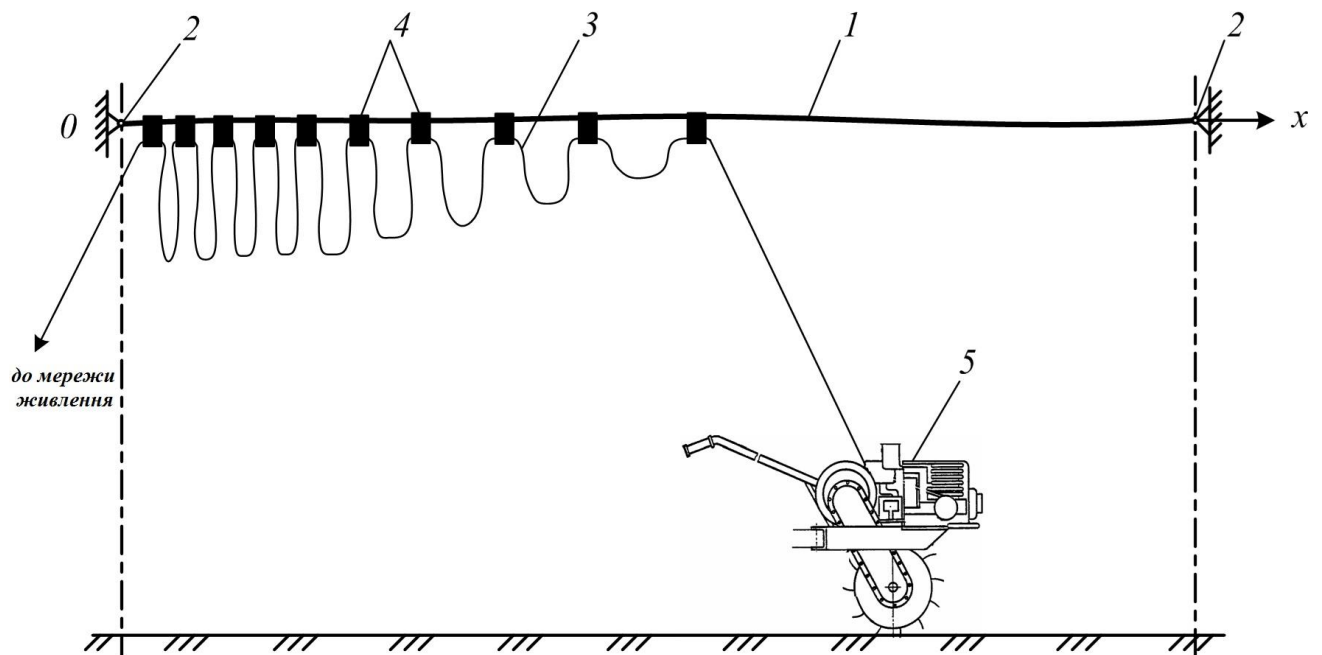
Важливим фактором, що визначає ефективність технологічних процесів обробітку ґрунту, що виконуються електромотоблоком або електрокультиватором в теплицях, на присадибних ділянках і малих фермерських господарствах, є спосіб електроживлення мобільного агрегату.

В даний час відомі наступні способи живлення мобільних електрифікованих машин і агрегатів в сільськогосподарському виробництва: кабельний, тролейний і акумуляторний, а також комбіновані способи живлення - акумуляторно-кабельний, тролейно-кабельний і ін. [51].

При кабельному способі електроживлення застосовуються кабель-штори, лоткові системи і кабельно-барабанні пристрої. Кабель-штора представляє собою гнучкий кабель, підвішений за допомогою кілець або скоб до несучого тросу або дроту, натягнутого між опорами (рис. 1.5). Кільця або скоби з листового металу прикріплюються до кабелю і при натягу кабелю вільно переміщаються по тросу. Зазвичай крок між скобами складає 1,5...2,0 м. Один кінець кабелю приєднується до мережі живлення, інший до мотоблока, який рухається уздовж несучого тросу, розтягуючи або збираючи кабель. При цьому забезпечується можливість маневрування агрегату в певних межах в поперечному напрямку щодо кабель-штори. Ступінь свободи маневрування залежить від довжини кабелю.

З огляду на невисокі вимоги до гнучкості і міцності кабелю живлення для кабель-штор в основному застосовуються кабелі марки КРТП і КрПГН з резиноюю ізоляцією, двох або чотирижильні з перетином мідних жил кабелю

1,0 і 2,5 мм². Такий кабель придатний для роботи в різних атмосферних умовах з тривало допустимою температурою жил кабелю до 65°C. Вигин кабелю і зусилля до нього під час роботи незначні. Вигин відбувається тільки під дією власної маси ділянки кабелю, довжина якого дорівнює кроку установки скоб. Зусилля при розтягуванні і зборі кабель-штор також визначаються власною масою кабелю і тертям скоб по трос або сталевому дроту і не перевищує 100-150 Н [72, 107].



1 - несучий трос; 2 - вузол кріплення; 3 - кабель; 4 - скоби; 5 - мотоблок.

Рисунок 1.5 - Схема живлення мотоблока гнучкою кабель-шторою

Останнім часом для електроживлення мотоблоків застосування отримав кабель марки ПВС з вінілової оболонкою і мідними жилами перетином від 0,75 до 2,5 мм². Ізоляція з вінілу надає кабелю жорсткість, що виключає утворення петель при зміні напрямку руху мотоблока. До переваг такого кабелю можна віднести протидію стиранню і досить високу міцність.

Довжина кабелю живлення дорівнює 25, 50 і 100 м. Штепсельне з'єднання кабелю виконується герметизований\м дво- або триштирьовим і забезпечується додатковими замками-фіксаторами, що запобігають відключення кабелю від мережі при натягу. При обробці невеликих земельних

ділянок зазначаються приклади успішного застосування кабелю живлення марки ПВС при безпосередньому його переміщенні під час роботи на поверхні ґрунту (рис. 1.6).

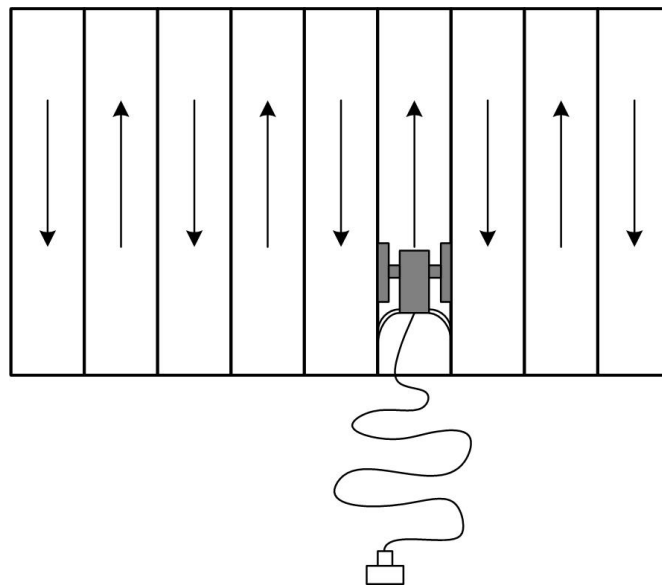
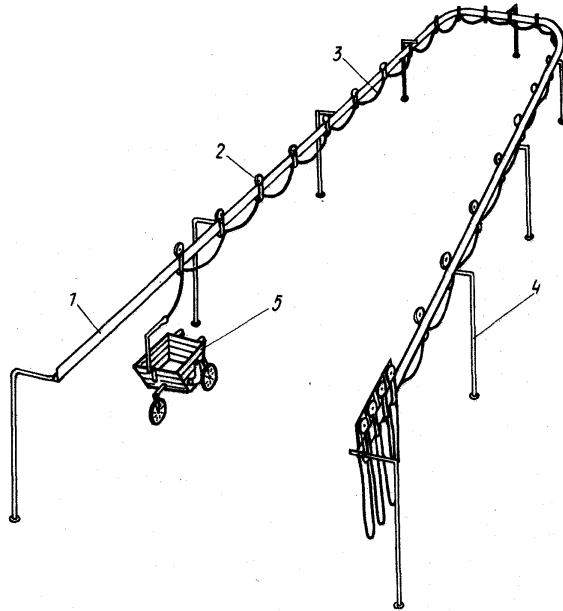


Рисунок 1.6 - Схема електроживлення електромобіля з розташуванням кабелю на поверхні ґрунту

В [86] наводиться конструкція кабель-штори в якій несучий трос замінено жорстким полками монорельса, по якому рухаються каретки із закріпленим на них гнучким кабелем. Така конструкція (рис. 1.7) дозволяє рухатися як по прямолінійним, так і по криволінійним ділянкам. Довжина в даному випадку обмежена міцністю кабелю, який одночасно переміщує каретки по монорейці.

Кабельне живлення електромобілів має такі недоліки:

- обмежений радіус дії агрегату (до 100 м);
- порівняно велика маса і вартість кабелю при збільшенні радіусу дії агрегату понад 100 м;
- наявність падіння напруги і електричних втрат в кабелі;
- обмежений термін служби кабелю внаслідок частих вигинів і скручування при експлуатації.



1 - монорельс; 2 - каретка; 3 - кабель; 4 - стійки; 5 - мотоблок

Рисунок 1.7 - Схема живлення електромоблока з жорсткою кабель-шторою

Що стосується таких способів електроживлення мобільних електрифікованих сільськогосподарських машин, як тролейний і лотковий, то для розглянутого класу електромоблоків вони неприйнятні внаслідок складності і великої вартості [86].

Заслуговує увагу акумуляторний спосіб живлення електромоблоків легкої і середньої серії з електродвигунами потужністю до 3-х кВт [140, 141, 148, 151, 155]. Такі мобільні агрегати були створені в Болгарії та США в 80-х роках минулого сторіччя, проте широкого поширення не отримали з причини великої маси і малої енергоємності акумуляторних батарей. Останні десятиріччя характеризується зростанням виробництва електромобілів різного класу [43, 131,]. У зв'язку з цим відзначається створення енергоємних, порівняно легких і недорогих акумуляторних батарей з великим терміном експлуатації. Поряд з вдосконаленням свинцевих, нікель-залізних, нікель-цинкових і нікель-кадмієвих акумуляторних батарей велика робота ведеться по створенню нового покоління акумуляторів на основі цинк-хлориду (Zn / Cl_2), цинк-бром (Zn / Br_2), натрій-сірки (Na / S), літій-алюмінію, заліза-сірки ($Li / Al - Fe - S$) з підвищеною питомою енергоємністю з терміном служби 1000 і більше циклів.

До переваг таких акумуляторів відносяться висока надійність при одночасному зниженні їх вартості і витрат на експлуатацію. Основні параметри сучасних акумуляторних батарей наведені в таблиці 1.2.

На думку фахівців акумуляторні батареї з питомою енергоємністю 100 Втг/кг і більш можуть бути в найближчій перспективі використання в якості джерел живлення електромобільних транспортних засобів, в тому числі і мотоблоків з електроприводом постійного струму.

Таблиця 1.2

Основні параметри акумуляторних батарей

Параметри	Акумуляторні батареї на основі						
	<i>Pb / PbO₂</i>	<i>Ni / Fe</i>	<i>Ni / Zn</i>	<i>Na / S</i>	<i>Li / Al-Fe-S</i>	<i>Zn / Cl₂</i>	<i>Zn / Br₂</i>
Питома енергоємність, <i>Вт · г. / кг.</i>	30-40	70	70-90	130	120	100	100
Питома потужність, <i>Вт / кг.</i>	100	150	200	175	150	200	200
Термін служби, <i>циклів</i>	1250	2000	600	1000	1000	1000	1000

Відзначимо також, що в нашій країні і за кордоном активно ведеться пошук альтернативних джерел живлення мобільних електротранспортних засобів. У зв'язку з цим, становить інтерес проблема використання електрохімічних конденсаторів в якості основного джерела живлення. При заміні акумуляторних батарей в тому ж об'ємі можуть розміститися шість конденсаторних модулів, з'єднаних паралельно [8, 18, 142].

Аналіз існуючих способів електропостачання мобільних агрегатів з електроприводом, призначених для роботи в спорудах закритого ґрунту і на приватних присадибних ділянках показав, що найбільш ефективним є акумуляторний спосіб живлення при наявності акумуляторів з енергоємністю 100 Втгод./кг з малою масою і вартістю. Оскільки в наш час вартість високоємнісних акумуляторних батарей занадто висока, то найбільш раціональним з економічних міркувань є централізоване електропостачання

мотоблоків з електроприводом з використанням гнучких проводів і кабельно-барабанного пристрою.

1.4 Аналіз стану питання з розробки електроприводів мобільних енергетичних засобів

За останні 15-20 років мобільним енергетичним засобам малої механізації присвячена велика кількість публікацій [5-7,9,14,31,44], проте в них практично не розглядаються питання теорії, розрахунків і принципів конструювання мотоблоків та мотокультиваторів. Це пов'язано з корпоративними інтересами закордонних і вітчизняних фірм, що виготовляють мобільні засоби малої механізації.

Проблемі створення енергоощадних систем керування електричними машинами [9-11,25-27,37,40,41], і зокрема двигунами постійного струму [29], приділяється велика увага. Крім закону оптимального регулювання, обґрунтованого в [29], для оцінки раціонального регулювання тягового ДПС мотоблока, питанням енергозбереження в електроприводі присвячені роботи [28] і, нарешті, в [47] детально розглянуті питання керування тяговими ДПС по мінімуму втрат в приводі електротрансмісії великовантажних автомобілів. Однак отримані при цьому закони регулювання тягового електроприводу (ТЕП) по мінімуму втрат представляють собою складні функціональні залежності, практична реалізація яких можлива тільки на основі складних замкнених систем автоматичного керування ТЕП і не можуть бути використані для керування тяговими двигунами потужністю 1...3 кВт в приводі мотоблоків [110,133-139].

У зв'язку з цим важливим є формування таких режимів керування тяговим двигуном приводу електромоблока [143,146,151-154], які забезпечать оптимальне регулювання частоти обертання двигуна для кожного режиму роботи по максимуму ККД, за допомогою порівняно простих по конструкції і керуванню вентильних перетворювачів при централізованому електроживленні електромоблока.

1.5 Висновки за розділом та постановка задач досліджень

Проведені попередні дослідження показали, що перспективними для роботи в спорудах захищеного ґрунту є мобільні агрегати з тяговими електродвигунами (ТЕД), що отримали назву електромоблоків, як екологічно чисті агрегати, що не мають названих недоліків. Крім того, заміна ДВЗ на нерегульований електропривод з асинхронним двигуном не дозволяє забезпечити необхідний діапазон регулювання швидкості руху агрегату, а також високі енергетичні показники роботи електромоблока. Дослідження таких енергетичних засобів обробітку ґрунту є актуальним в Україні.

Такий стан питання створює **народногосподарську проблему**, суть якої полягає в підвищених питомих витратах енергоресурсів при виконанні основних видів обробітку ґрунту та його низькій техніко-економічній ефективності.

Це приводить до необхідності вирішення **науково-технічної задачі** з підвищення енергоефективності основних видів обробітку ґрунту за рахунок обґрунтування параметрів і режимів роботи електропривода ґрунтообробного мотоблока.

Метою дослідження є підвищення енергоефективності електропривода ґрунтообробного мотоблока за рахунок оптимізації його електричних параметрів і режимів роботи.

Задачі дослідження:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій електрифікованих малогабаритних ґрунтообробних мотоблоків та способів їх електроживлення.
2. Провести оптимізацію потужності, маси і лінійної швидкості електромоблока з урахування критерію оптимізації – тягового зусилля мотоблока.
3. Дослідити характеристики регулювання та обґрунтувати режими керування тяговим електродвигуном мотоблока.
4. Обґрунтувати систему керування тягового електродвигуна мотоблока.
5. Провести порівняльну техніко-енергетичну та техніко-економічну оцінку роботи електромоблока.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ОБҐРУНТУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМОТОБЛОКА

2.1 Аналіз тягових характеристик і параметрів регулювання електромоблока

Тягова характеристика моблока з електроприводом і централізованим електроживленням, як і інших мобільних енергетичних засобів, в тому числі і моблоків з ДВЗ, являє собою залежність тягового зусилля (F_m), що розвиває моблок від швидкості руху (v) при сталості приєднаної потужності приводного електродвигуна (P_1).

Узагальнена гранична тягова характеристика електрифікованих транспортних засобів представлена на рис. 2.1 [20,21].

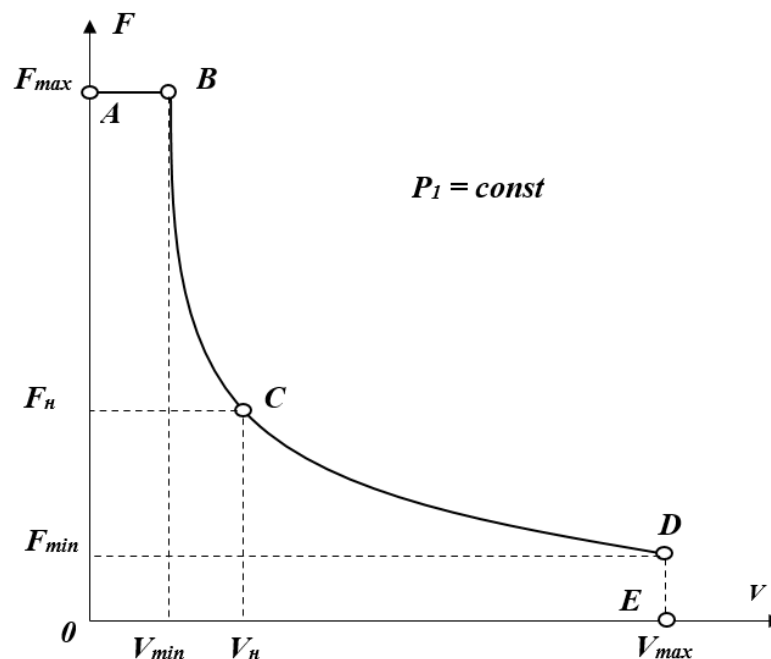


Рисунок 2.1 - Узагальнена гранична тягова характеристика електромоблока

Основним призначенням тягового електродвигуна в приводі електромоблока 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_1) (ділянка ВСD) і незмінності максимальної швидкості (V_{\max}) (лінія DE). При цьому ділянка, на якій забезпечується режим сталості потужності $P_1 = \text{const}$ має

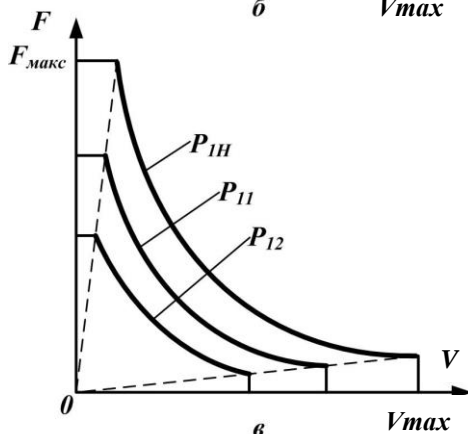
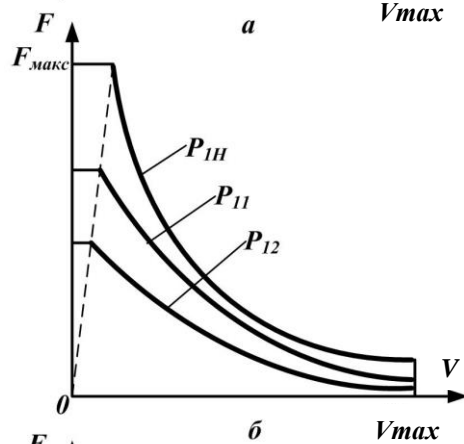
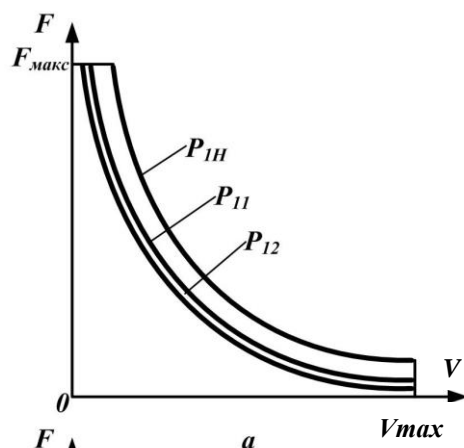


Рисунок 2.2 - Тягові характеристики мотоблока: $P_{1H} > P_{1I} > P_{1II}$

форму гіперболи і містить дві характерні зони: короткочасної роботи в режимі сталості потужності P_1 (лінія ВС) і зони тривалої роботи при $P_1 = \text{const}$ (лінія CD). Точки В і D є граничними, в яких відбувається перехід електромоблока на режими підтримки незмінності потужності (В) і сталості максимальної швидкості (D).

За номінальне значення тягового зусилля F_n приймається сила, що забезпечує рух електромоблока 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_n), вологості ґрунту та ін.

Електромоблоки з ТЕД за умовами навантаження можуть експлуатуватися при потужності $P_1 < P_{1H}$. Це означає, що разом з

граничними тяговими характеристиками при $P_1 = P_{1n}$ агрегат буде працювати на часткових тягових характеристиках, розташованих в області $OABCDE$ (рис. 2.1). Сімейство часткових тягових характеристик $F(V)$ представлено на рис. 2.2, а, б, в, де в різних поєднаннях враховується можливість отримання як максимального тягового зусилля, так і максимальної швидкості при споживанні з мережі живлення електричної потужності $P_1 < P_{1n}$. Необхідність регулювання тягового зусилля згідно характеристик на рис. 2.2 обумовлена в першу чергу технологічними циклами роботи електромобіля і умовами його експлуатації. Реалізація часткових тягових характеристик різного виду забезпечується відповідним керуванням тяговим електродвигуном [26,27,31].

За тяговою характеристикою мобіля $F(v)$ (рис. 2.1) може бути отримана механічна характеристика тягового електродвигуна мобіля, що представляє собою залежність електромагнітного моменту від кутової швидкості $M(\omega)$ з використанням наступних співвідношень [41,50,123,]

$$M = \frac{R_{\kappa}}{i_p \cdot i_n \cdot \eta_p \cdot \eta_n \cdot \eta_{\kappa}} \cdot F_m ; \quad (2.1)$$

$$\omega = \frac{i_p \cdot i_n}{R_{\kappa}} \cdot V, \quad (2.2)$$

де F_m - тягове зусилля, Н;

V - лінійна швидкість руху, м / с;

R_{κ} - радіус кочення колеса мобіля, 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);

η_{κ} - ККД колеса.

Побудована таким чином механічна характеристика $M(\omega)$ тягового електродвигуна мобіля наведена на рис. 2.3. 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 BCD; обмеження швидкості обертання $\omega_{max} = const$ - лінія DE. Координати точок $B(M_{max}; \omega_{min})$; $C(M_n; \omega_n)$ і $D(M_{min}; \omega_{max})$ на механічній характеристиці 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 C з координатами M_n і ω_n . На характеристиці $M(\omega)$ точка B відповідає швидкості ω_{min} і виходу двигуна на режим сталості споживаної від джерела потужності $P_1 = const$. Коефіцієнти зміни швидкості і моменту K_ω 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.

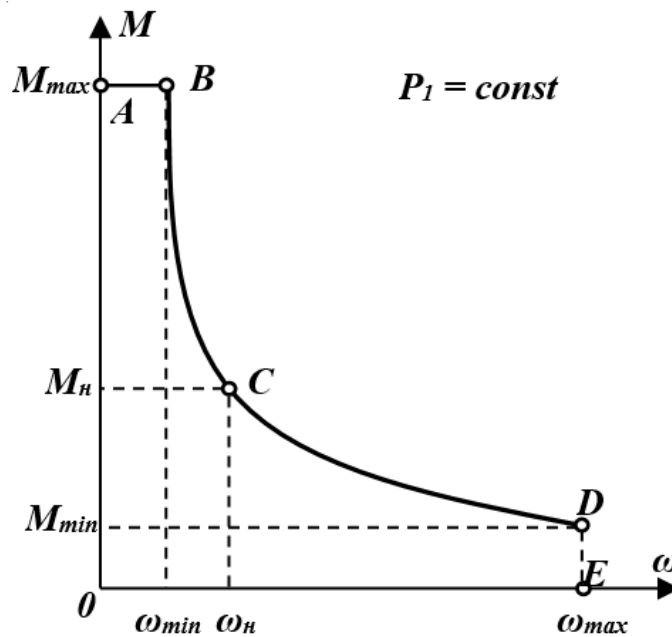


Рисунок 2.3 – Механічна характеристика тягового електродвигуна постійного струму електромобіля

При цьому

$$K_\omega = \omega_{max} / \omega_n = K_n = n_{max} / n_n = K_V = V_{max} / V_n, \quad (2.3)$$

тобто коефіцієнти зміни кутової швидкості K_ω і частоти обертання K_n тягового електродвигуна, а також швидкості руху K_v електромоблока мають рівні значення. Механічні характеристики є законом регулювання тягового двигуна електромоблока. При реалізації граничних залежностей $F(V)$ і $M(\omega)$ тяговий електродвигун споживатиме з мережі живлення номінальну приєднану потужність P_{In} . Для практичної реалізації закону регулювання тяговим двигуном, що визначається характеристикою $M(\omega)$ наведеною на рис 2.3, доцільно використовувати в якості тягового електродвигун постійного струму (ДПС) послідовного збудження, 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 [31,76,123,127].

Функційні залежності $U(I)$, отримані в результаті перетворення характеристики $M(\omega)$ представленої на рис. 2.3 і рівнянь, що визначають властивості двигуна в усталеному режимі роботи [70,84]

$$\begin{aligned} U &= E_a + IR_a; E_a = k\Phi\omega; \\ M &= k\Phi I; \omega = \frac{U - IR_a}{k\Phi}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

де E_a - ЕРС якоря;

M - електромагнітний момент;

Φ - магнітний потік;

R_a - опір в колі якоря;

k - конструктивна стала.

При цьому для двигуна постійного струму послідовного збудження

$$R_a = R_y + R_{\partial n} + R_{\text{щ}} + R_{\text{зб}}, \quad (2.5)$$

де $R_y; R_{\partial n}; R_{\text{щ}}; R_{\text{зб}}$ – 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 $P_{I^*} = P_1 / P_{1н}$; напруга живлення $U_* = U / U_n$; струм якоря $I_{a^*} = I_a / I_n$; електрорушійна сила $E_* = E / U_n$; кутова швидкість $\omega_* = \omega / \omega_n$; частота обертання $n_* = n / n_n$; електромагнітний момент $M_* = M / M_n$; корисна потужність на валу $P_{2^*} = P_2 / P_{2н}$; коефіцієнт корисної дії $\eta = P_2 / P_1 = P_{2^*} / P_{I^*}$; магніторушійна сила збудження $F_{зб^*} = F_{зб} / F_{зб.н}$; струм збудження $I_{зб^*} = I_{зб} / I_{зб.н}$; коефіцієнт ослаблення поля двигуна послідовного збудження, $\beta = I_{зб} / I_a = I_{зб^*} / I_{a^*}$; магнітний потік $\Phi_* = \Phi / \Phi_n$, а також наступними співвідношеннями

$$I_{max^*} = I_{max} / I_n = K_M \Phi_*; \quad (2.6)$$

$$M_* = \Phi_* \cdot I_*, \text{ звідки } I_* = M_* / \Phi_*; \quad (2.7)$$

$$P_{I^*} = U_* \cdot I_* = P_1 / P_{1н}, \text{ звідки } I_* = I / U_* \quad (2.8)$$

$$P_{розр} = P_n \cdot K_\omega \approx M_n \cdot \omega_{max}. \quad (2.9)$$

Рівняння (2.4 ... 2.6) дозволяють також визначити параметри тягового двигуна постійного струму в вузлових точках тягової характеристики $M(\omega)$, наведеної на рис. 2.3. Вважаємо, що в якості номінальних значень прийняті напруга $U = U_n$ і струм $I = I_n$, для режимів роботи ТЕД послідовного збудження, відповідних точкам В і D, отримаємо

$$\begin{aligned} U_B = U_{min} &= E + IR_a = K\omega_B \cdot \Phi_B + IR_a; \\ U_D = U_{max} &= E + IR_a = K\omega_D \cdot \Phi_D + IR_a. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Так як згідно (2.4) в номінальному режимі

$$E_n = K\omega_n \cdot \Phi_n, \text{ звідки } K = E_n / \omega_n \cdot \Phi_n; \quad (2.11)$$

$$M_n = KI_n \cdot \Phi_n, \text{ звідки } K = M_n / I_n \cdot \Phi_n.$$

Після підстановки значень коефіцієнтів K до системи рівнянь (2.10), отримаємо

$$U_{min} = E_n \omega_{B^*} \Phi_{B^*} + K_M \Delta U_n / \Phi_{B^*}; \quad (2.12)$$

$$U_{max} = E_n K_\omega \Phi_{D^*} + M_{min^*} \Delta U_n / \Phi_{D^*}, \quad (2.13)$$

де ΔU_n - спадання напруги в колі якоря при $I = I_n$.

Вирішивши (2.12) та (2.13) щодо параметрів регулювання K_M і K_ω , можна оцінити прийнятні способи керування ДПС для реалізації закону регулювання $M(\omega)$ і, отже, тягової характеристики $F(V)$.

Згідно (2.12) та (2.13), регулювання кутової швидкості ω ДПС раціонально здійснювати за рахунок зміни напруги на колекторі U і магнітного потоку Φ .

Основними експлуатаційними показниками електромоблока, 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 V_n , що визначають приєднану потужність P_l тягового двигуна, максимальна сила тяги F_{max} і швидкість V_{max} . Зазначені показники встановлюються на початковому етапі розробки електромоблока 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. 2.1). Сумарну силу тяги F для сталої швидкості руху мотоблока можна визначити за співвідношенням [73,101,109,111]

$$F = G(\lambda\varphi + \xi f), \quad (2.14)$$

де G - експлуатаційна вага мотоблока, кН;

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

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

ξ - коефіцієнт, що враховує внутрішні втрати в ходовій системі;

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

Гранична залежність $F(V)$ електромоблока може бути побудована за рівнянням

$$F = P_{1n} \eta_{\Sigma} / V, \quad (2.15)$$

де P_{1n} - потужність споживана з мережі при номінальному навантаженні;

η_{Σ} - сумарний ККД приводу;

При цьому

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{en} \eta_o \eta_p \eta_k, \quad (2.16)$$

де η_{en} - ККД вентильного перетворювача;

η_o - ККД тягового електродвигуна;

η_p - ККД редуктора;

η_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 постійного струму 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

$$i_p = R_k \omega_{dmax} / V_{max}. \quad (2.17)$$

Номінальна потужність ТЕД залежить від параметрів F_n і V_n тягової характеристики

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

Таким чином, експлуатаційні показники електромоблока, а також його тягова характеристика $F(V)$ і механічна характеристика $M(\omega)$ тягового двигуна дозволяють визначити параметри регулювання K_{ω} , K_M , U_{max*} , I_{max*} , Φ_* , 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.

2.2 Обґрунтування структури силового енергетичного каналу електромоблока

Електропривод мотоблока являє собою послідовне з'єднання елементів в енергетичній частині, що утворюють силовий канал, а також процеси передачі і перетворення енергії. Структура такого електроприводу наведена на рис. 2.4, а. В її складі – силові елементи, які беруть безпосередню участь в процесі перетворення електричної енергії в механічну, і елементи, що перетворюють інформацію, необхідну для керування процесом перетворення енергії. Інформаційна частина представлена без поділу на блоки і в загальному випадку вона може бути пов'язана з усіма силовими елементами. Розглянемо «зліва - направо» елементи силового каналу, які беруть участь в перетворенні енергії [53,54].

Першим показаний елемент силового каналу, який представляє собою гнучкий кабель, за допомогою якого здійснюється підведення електричної енергії з мережі змінного струму. Вважаємо, що з кабелем пов'язані характеристики напруги живлення- частота, величина спадання напруги при зміні споживаного струму і т.і. Якість напруги живлення впливає на режим роботи наступних елементів і, навпаки, характеристики і режими наступних елементів визначають режим і втрати енергії в кабелі $\Delta W_{ГК}$. Вентильний перетворювач перетворює електричну енергію змінного струму в електричну енергію постійного струму, необхідну для живлення електромеханічного перетворювача у вигляді тягового електродвигуна постійного струму. Крім того, вентильний перетворювач виконує роль пристрою керування рівнів потоків енергії до тягового двигуна. Фізичною реалізацією вентильного перетворювача є тиристорний керований випрямляч. В процесі перетворення електричної енергії в ньому виникають втрати енергії $\Delta W_{ВІТ}$.

Тяговий електродвигун при перетворенні електричної енергії в механічну, задає з урахуванням параметрів і навантажень механічної частини характер механічного руху і змінні, що визначають цей рух: електромагнітний момент M і кутову швидкість ω при обертальному русі, силу тяги F і лінійну швидкість V при поступальному русі робочого органу. При електромеханічному перетворенні енергії в ДПС виникають втрати енергії $\Delta W_{Д}$ [54].

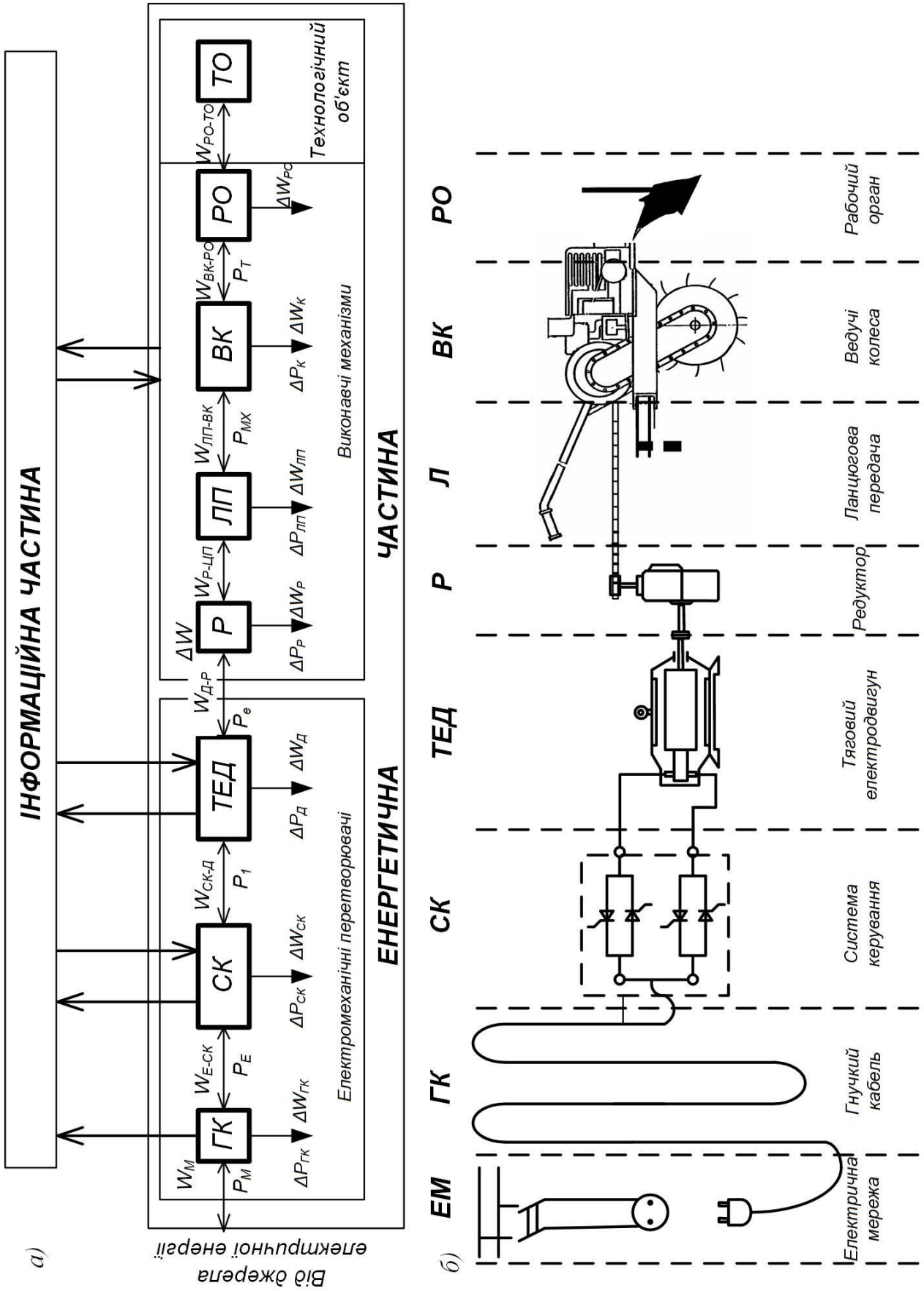


Рисунок 2.4 - Структурна (а) і електромеханічна (б) схеми енергетичного силового каналу електромобіля

Стосовно до електромоблока, змінні, задані ТЕД, перетворюються до вигляду і параметрів, необхідних на робочому органі, наприклад, плузі при оранці ґрунту. Тому в складі силової частини енергетичного каналу передбачено передавальний механізм, що пов'язує ТЕД з виконавчим механізмом. В електроприводі мотоблока в якості передавального механізму використовується редуктор, що знижує швидкість і збільшує момент, отриманий на виході ТЕД до величини, необхідної виконавчому механізму, роль якого виконують колеса мотоблока, що обертаються на осі і переміщуються по ґрунту з необхідною швидкістю V . При цьому в редукторі, колесах і робочому органі в робочих режимах виникають втрати $\Delta W_{ПМ}$, $\Delta W_{БК}$ і $\Delta W_{РО}$ (рис. 2.5, а). Таким чином, процес передачі і перетворення енергії в силовому каналі електромоблока супроводжується її частковою втратою в кожному з елементів. Всі елементи силового каналу електропривода постійного струму здатні накопичувати енергію в тому чи іншому вигляді в залежності від типу елемента. Ця здатність визначається наявністю в силовому каналі індуктивних елементів-накопичувачів електричної енергії і магнітного поля; пружних елементів, що накопичують потенційну механічну енергію; обертових і рухомих лінійних мас, здатних акумулювати кінетичну енергію. В силових електроприводах найбільш «ємними» накопичувачами енергії є елементи механічної частини. Тому складаючи баланс потужностей потоків енергії для силового каналу електроприводу мотоблока, обмежимося урахуванням кінетичної енергії рухомих мас, вважаючи, що змін потенційної енергії в системі не відбувається. Отримаємо рівняння балансу потужностей електромоблока [54]

$$P_E = \sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} + \sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt} + \sum_k \Delta P_k + M\omega + FV, \quad (2.19)$$

де P_E - потужність потоку електричної енергії, що споживається з мережі, Вт;

$$\sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} \text{ і } \sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt}, \quad (2.20)$$

потужності пов'язані зі збільшенням або зменшенням мас, що рухаються обертально або лінійно;

$\sum_k \Delta P_k$ - сумарні втрати потужності потоків енергії у всіх елементів силового

кола, Вт;

$M\omega$, FV - потужності механічної енергії, пов'язані з обертальним або поступальним рухом, Вт.

При цьому сумарна потужність втрат в силовому каналі становить

$$\sum_k P_k = \Delta P_{ГК} + \Delta P_{ВП} + \Delta P_{Д} + \Delta P_{МП} + \Delta P_{К}, \quad (2.21)$$

де $\Delta P_{ГК}$ - електричні втрати в живлячому гнучкому кабелі, Вт;

$\Delta P_{ВП}$ - втрати в керованому випрямному перетворювачі, Вт;

$\Delta P_{Д}$ - сумарні втрати в двигуні постійного струму, Вт;

$\Delta P_{МП}$ - втрати потужності в механічній передачі, Вт;

$\Delta P_{К} = \Delta P_{\sigma} + \Delta P_f$ - втрати в ходовій частині на буксування коліс ΔP_{σ} і перекачування коліс ΔP_f , Вт.

У загальному випадку ККД електроприводу визначається як співвідношення корисної роботи (енергії) на виході пристрою до витраченої енергії на вході пристрою

$$\eta = W_2 / W_1 = W_{p.o.} / W_E. \quad (2.22)$$

Якщо робота електромоблока оцінюється за період часу, на якому потужності на вході і виході постійні, то значення ККД визначається відношенням

$$\eta = P_2 / P_1 = P_T / P_E, \quad (2.23)$$

де P_T - тягова потужність на робочому органі, Вт.

При цьому

$$P_T = F \cdot V, \quad (2.24)$$

де F - тягове зусилля електромоблока, Н;

V - швидкість переміщення агрегату, м/с.

При змінному характері навантаження з часом циклу t_u значення ККД конкретного режиму роботи на підставі (2.22) визначається у вигляді

$$\eta = \frac{\int_0^{t_u} P_2 dt}{\int_0^{t_u} P_2 dt + \int_0^{t_u} P_\Sigma dt}. \quad (2.25)$$

Оскільки потужність втрат містить постійну і змінну складові, перша з яких практично не залежить від навантаження, а друга в загальному випадку пропорційна корисній потужності у ступені $\kappa > 1$, то рівняння (2.23) можна записати в наступному вигляді

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + (aP_2 + bP_2^\kappa)}, \quad (2.26)$$

де a, b і κ - коефіцієнти, що визначають конкретний вид залежності потужності втрат від корисної потужності.

Залежність $\eta(P_2)$ по (2.23) має максимум, оскільки при $P_2 \rightarrow 0, \eta \rightarrow 0$ і при $P_2 \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 0$, тобто залежність $\eta(P_2)$ має класичний вигляд графіка ККД пристрою, для якого справедливо співвідношення (2.23). При цьому, як правило, максимальне значення ККД η_{max} в залежності $\eta(P_2)$ відповідає корисному навантаженню $P_2 = (0,7...0,8)P_n$.

Важливим показником ефективності роботи мотоблока є тяговий ККД, який визначається співвідношенням

$$\eta = \frac{P_T}{P_E}, \quad (2.27)$$

де P_E - ефективна або корисна потужність тягового електродвигуна, Вт.

При обліку втрат енергії в механічній передачі і на пересування мотоблока, тяговий ККД оцінюється залежністю

$$\eta_T = \eta_{МП} \eta_\delta \eta_f = \eta_{МП} \eta_\kappa. \quad (2.28)$$

Тягова потужність P_T з урахуванням (2.23) і (2.27) може бути визначена за рівнянням

$$P_T = F \cdot V = P_e \cdot \eta_{МП} \cdot \eta_\theta \cdot \eta_f. \quad (2.29)$$

Для практичних розрахунків потужності P_E ТЕД в приводі мотоблока використовуємо рівняння [64]

$$P_E = \frac{(F + fG_{мб})V}{\eta_{МП}\eta_\theta\eta_f}, \quad (2.30)$$

де f - коефіцієнт опору пересуванню;

$G_{мб}$ - експлуатаційна вага або сила тяжіння мотоблока, кН;

Тяговий момент, що розвиває електромотор, визначається за рівнянням

$$M = FR_\kappa = Mi_{МП}\eta_T, \quad (2.31)$$

і кутова швидкість по (2.2)

$$\omega = \frac{i_{МП}}{R_\kappa} V, \quad (2.32)$$

де $i_{МП}$ - передавальне відношення механічної передачі.

При наявності редуктора і ланцюгової передачі

$$i_{МП} = i_P i_{ЛП}. \quad (2.32)$$

ККД тягового електродвигуна за загальним правилом визначається як відношення корисної потужності P_2 до споживаної P_1

$$\eta = P_2 / P_1. \quad (2.33)$$

або через втрати з урахуванням, що $P_2 = P_1 - \Delta P_\Sigma$ і $P_1 = P_2 + \Delta P_\Sigma$

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_\Sigma}{P_2 + \Delta P_\Sigma}, \quad (2.34)$$

де ΔP_Σ - сумарні втрати ТЕД.

У загальному випадку потужність втрат енергії в електродвигунах прийнято представляти сумою постійних втрат ΔP_c , що не залежать від навантаження, і змінних втрат ΔP_v , які визначаються навантаженням двигуна

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_c + \Delta P_v. \quad (2.35)$$

Розглянемо докладніше втрати в ТЕД стосовно ДПС послідовного збудження. Постійні втрати потужності включають в себе магнітні втрати на гістерезис і вихрові струми $\Delta P_{мг}$, механічні втрати $\Delta P_{мх}$ і додаткові від дії вищих гармонійних складових ΔP_{δ} .

Магнітні втрати визначаються за рівнянням [23]

$$\Delta P_{мг} = \Delta P_{мг.ном.} (\omega / \omega_n)^{\beta} \cdot (\Phi / \Phi_n)^2, \quad (2.36)$$

де $\Delta P_{мг.ном.}$ - магнітні втрати при номінальних потоці і частоті обертання;

$\beta = 1,2...1,5$ - показник, що залежить від марки електротехнічної сталі.

Приймається $\beta = 1,5$ [23].

Механічні втрати визначаються значенням кутової швидкістю електродвигуна

$$\Delta P_{мх.} = \Delta P_{мх.ном.} (\omega / \omega_n)^n, \quad (2.37)$$

де $\Delta P_{мх.ном.}$ - механічні втрати при номінальній швидкості;

$n = 1,0...1,5$ - показник ступеня. Приймається $n = 1,5$ [23].

Додаткові втрати по стандарту приймаються рівними [23]

$$\Delta P_{\delta} = 0,005 P_{1н}, \quad (2.38)$$

де $P_{1н}$ - потужність споживана з мережі при номінальному навантаженні двигуна, кВт.

Змінні втрати потужності включають електричні втрати в колі обмотки якоря ΔP_a , втрати в обмотці послідовного збудження $\Delta P_{зб.}$ і втрати в перехідному опорі щітка-колектор $\Delta P_{щ}$.

Електричні втрати в колі якоря

$$\Delta P_a = I_a^2 R'_a, \quad (2.39)$$

де R'_a - опір кола якоря без $R_{зб.}$.

Електричні втрати в обмотці послідовного збудження

$$\Delta P_{зб.} = \beta_{он}^2 R_{зб.} = (I_{зб.} / I_a)^2 R_{зб.}, \quad (2.40)$$

де $R_{зб.}$ - опір обмотки послідовного збудження.

β_{OP} – коефіцієнт ослаблення поля шляхом шунтування опором обмотки послідовного збудження з метою зменшення струму збудження і потоку.

При цьому

$$\beta_{OP} = (I_{зб.} / I_a)^2, \quad (2.41)$$

де $I_{зб.}; I_a$ – струми збудження і якоря.

Електричні втрати в щітковому контакті

$$\Delta P_{щ} = I_a^2 R_{щ}, \quad (2.42)$$

де $R_{щ}$ – опір щіткового контакту.

Таким чином, постійні втрати в ДПС

$$\Delta P_c = \Delta P_{мг} + \Delta P_{мх} + \Delta P_{\delta}, \quad (2.43)$$

і змінні втрати

$$\Delta P_v = \Delta P_a + \Delta P_{зб.} + \Delta P_{щ}. \quad (2.44)$$

Остаточне рівняння ККД двигуна постійного струму набуде вигляду

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_c + \beta^2 \Delta P_v}{\beta P_2 + \Delta P_c + \beta^2 \Delta P_v}, \quad (2.45)$$

де β - коефіцієнт завантаження двигуна, рівний

$$\beta = \frac{P_2}{P_{2н}} = \frac{P_E}{P_{Ен}}. \quad (2.46)$$

Взявши похідну $d\eta / d\beta$ по (2.45) і прирівнявши її нулю, отримаємо співвідношення

$$\Delta P_c = \beta_m^2 \Delta P_v, \quad (2.47)$$

де β_m - коефіцієнт завантаження ДПС, при якому ККД двигуна буде максимальний.

Таким чином, співвідношення (2.47) визначає умову отримання максимального ККД ДПС, згідно якого ККД двигуна буде максимальним при такому навантаженні, коли змінні втрати $\beta^2 \Delta P_v$ дорівнюватимуть постійним втратам ΔP_c .

Значення коефіцієнта навантаження при максимальному ККД, згідно (2.47)

$$\beta_m = \sqrt{\Delta P_c / \Delta P_v}. \quad (2.48)$$

Зразковий вид графіка ККД ТЕД представлений на рис. 2.5

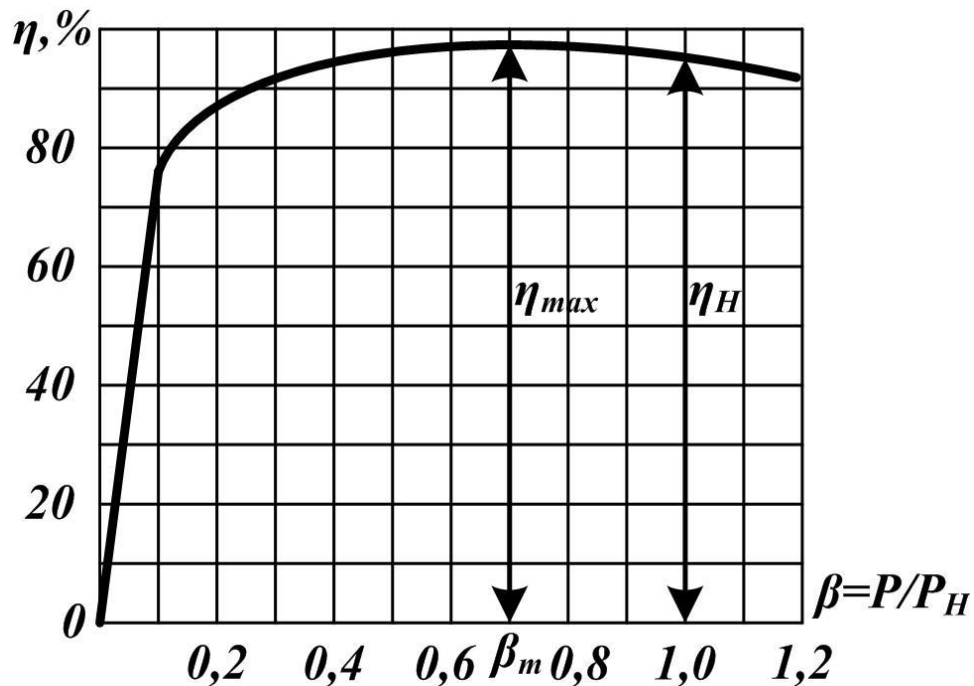


Рисунок 2.5 - Графік ККД тягового електродвигуна мотоблока

Змінюючи співвідношення втрат ΔP_c і ΔP_v , можна забезпечити максимальне значення ККД при різних навантаженнях. Якщо за призначенням ДПС працює здебільшого при навантаженнях близьких до номінального, тоді економічно обґрунтовано те, щоб значення β_m було близько до одиниці. Якщо двигун призначений для роботи в основному при недовантаженні, то в цьому випадку доцільно, щоб значення β_m було менше одиниці. Зазвичай ТЕД постійного струму мають $\beta_m = 0,8 \dots 0,85$ [64].

2.3 Розробка методики розрахунку потужності і вибору тягового електродвигуна мотоблока

Вибір електродвигуна для приводу електромоблока є однією з найбільш складних і відповідальних завдань в процесі створення тягового електроприводу мотоблоків, особливо на початковому етапі розробки. Обраний двигун повинен забезпечувати заданий технологічний режим робочого органу мотоблока з високими енергетичними показниками, відповідати компонованню

елементів конструкції мотоблока і умовам навколишнього середовища при нормативному нагріванні.

Вибір серійних електродвигунів виконується з урахуванням наступних 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 електромоблока, до яких відносяться: повна маса (G); радіус ведучого колеса (R_k); тривала або номінальна сила тяги (F_n) і швидкість руху при тривалому режимі (V_n), що визначає ефективну потужність (P_E) ТЕД; максимальна сила тяги (F_{max}) і швидкість руху (V_{max}), що встановлюються на початковому етапі розробки електроприводу мотоблока 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 обраного двигуна по нагріванню.

Відзначимо також, що вибір потужності, кутової швидкості, основних розмірів ТЕД і передавального числа редуктора i_p 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 електромоблока,

особливостям компонування 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 електроприводу.

2.3.1 Вибір тягового електродвигуна за родом струму

Для практичної реалізації характеристики $M(\omega)$ для електропривода мотоблока 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 ω змінюється автоматично, забезпечуючи потужність $P_1 = const$, що відповідає закону регулювання ТЕД мотоблока (рис. 2.3). 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 [55].

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

		АД	ДПС
- кратність пускового струму	$K_i = I_{II} / I_n$	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. Ця обставина важлива для електромоблока з централізованим електроживленням [55].

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. 2.3) кутова швидкість двигуна $\omega \sim 1 / \sqrt{M}$, 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.

2.3.2 Розрахунок потужності і вибір тягового ДПС

Загальноприйнята методика визначення розрахункової потужності приводного електродвигуна з використанням навантажувальних діаграм $P(t)$ і $M(t)$ робочих машин не прийнятна для вибору ТЕД мотоблока, оскільки

навантажувальні діаграми мотоблоків з ДВЗ і ТЕД не набули поширення. Тому запропонована методика розрахунку потужності і вибору тягового ДПС мотоблока заснована на використанні значень тягових зусиль F , необхідних для виконання мотоблоком основних технологічних процесів.

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

$$F = K \cdot a \cdot v, \quad (2.49)$$

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

K - питомий опір ґрунту, кПа.

Відповідно до системним дослідженням наведених в [64] визначено три категорії ґрунтів: важкі (F_B), середні (F_C) і легкі (F_L), питомі опори яких відповідно рівні $K_B = 90 \text{ кПа}$; $K_C = 60 \text{ кПа}$; $K_L = 30 \text{ кПа}$.

В приватних присадибних господарствах і спорудах закритого ґрунту в основному використовують плуги ПЛ-20 та ПЦ-1-18 з характеристикою плужних корпусів $v/a = 1,2 \dots 1,5$. Оранка ґрунту проводиться на глибину $a = 10, 15, 18$ і 20 см . Як правило, використовуються плуги з шириною захвату $v = 18 \text{ см}$, тоді приймаючи глибину підкопу пласта $a = 20 \text{ см}$, по (2.49) 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 $G = m \cdot g$ мотоблока масою m , була певної величини в залежності від характеристики ґрунту.

При цьому [64]

$$G = F / (\lambda \cdot \varphi_c - \xi \cdot f), \quad (2.50)$$

де λ – коефіцієнт навантаження коліс мотоблока;

φ_c – коефіцієнт зчеплення коліс з ґрунтом;

ξ – коефіцієнт, що враховує внутрішні втрати в ходовій системі;

f – коефіцієнт опору перекачування коліс.

Для мотоблоків 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 $G_D = 1,35 \text{ кН}$. Для мотоблоків з металевими колесами, що мають шипи

$$G_B = 2,7 \text{ кН}; G_C = 1,8 \text{ кН} \text{ і } G_D = 0,9 \text{ кН}, \quad (2.51)$$

тобто при використанні металевих коліс потрібна менша зчіпна вага мотоблока G .

Корисна потужність тягового електродвигуна електромотоблока визначається за рівнянням [64]

$$P = \frac{(F + fG)V}{\eta_p \cdot \eta_\delta \cdot \eta_\kappa}, \quad (2.52)$$

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

G - зчіпна вага, кН;

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

η_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 електромотоблока. У попередніх розрахунках приймається $\eta_T = 0,74 \dots 0,76$. Для більш точного розрахунку потужності за рівнянням (2.52) необхідно визначити тяговий ККД з урахуванням реальної компоновки механічної передачі мотоблока: типу редуктора, можливості використання додаткової ланцюгової передачі і т.і. Швидкість руху мотоблока V при підстановці в рівняння (2.52), приймається відповідно з доцільним діапазоном швидкостей, встановлених на підставі досліджень і спостережень за роботою мобільних агрегатів, керованих операторами чоловічої і жіночої статі: $V = 0,3; 0,6; 0,9; 1,2 \text{ м/с}$ або $V = 1,08; 2,16; 3,24; 4,32 \text{ км/год}$. [64]. На рис. 2.6 представлені графіки корисної потужності $P(V)$ при $K = const$ тягових двигунів мотоблоків за результатами

розрахунків за рівнянням (2.52) при $\eta_T = 0,75$; для легких, середніх ґрунтів і важких ґрунтів.

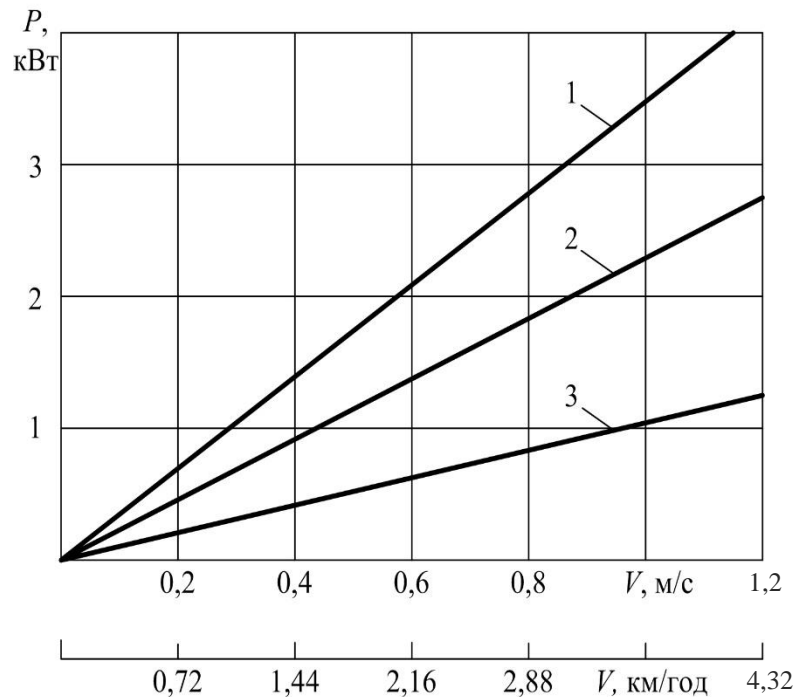


Рисунок 2.6 - Графіки потужності тягового електродвигуна електромоблока при оранці ґрунтів: 1 - важких, 2 – середніх, 3 - легких

Графіки потужностей (рис. 2.6) можуть бути використані на практиці для визначення розрахункової потужності тягових електродвигунів в приводі мотоблоків, призначених для обробки ґрунтів з різними характеристиками по питомому опору K .

Далі за величиною розрахункової потужності P за довідником або каталогу електрообладнання [45] 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 О4. Важливим параметром при виборі

двигуна крім ККД є показник якості машини, визначається відносною масою електродвигуна, кг / кВт

$$q = G_0 / P_n, \quad (2.53)$$

де G_0 - маса електродвигуна, кг.

2.3.3 Вибір передавального відношення редуктора

Передавальне відношення редуктора в приводі мотоблока можна визначити з співвідношення (2.2) для максимальних значень кутової швидкості двигуна ω_{max} і швидкості руху агрегату V_{max}

$$i_p = \frac{\omega_{max} \cdot R_k}{V_{max}}. \quad (2.54)$$

При проведенні системних випробувань металевих і гумових коліс мотоблоків з ДВЗ і ТЕД [77], обґрунтовані раціональні конструкції ведучих коліс з оптимальним діаметром $D_k = 520 \text{ мм}$. Максимальна швидкість серійних ДПС загальнопромислового призначення становить $n_{max} = 4000 \text{ об / мин}$, Тобто $\omega_{max} = 418,7 \text{ рад / с}$. В [77] також встановлено робочий діапазон швидкостей мотоблоків при оранці ґрунту (2.51). Приймавши для розрахунку i_p , $V_{max} = 1,2 \text{ м / с}$, 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 мотоблоках. Тому механічну передачу в електромоблоках доцільно виконувати з використанням редукторів з передавальним відношенням $i_p \leq 40$ і ланцюговою передачею з $i_n \cong 2 \dots 3$. В цьому випадку передавальне відношення механічної передачі визначається

$$i_{МП} = i_p \cdot i_n. \quad (2.55)$$

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

2.3.4 Перевірка тягового електродвигуна привода електромоблока

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

Перевірка ТЕД за умовами пуску проводиться за умовою [126]

$$M_{II} = M_{max} = M_H \cdot K_M \cdot K_U^2 \geq 1,25 \frac{M_{зр.}}{i_{МП} \cdot \eta_{МП}}, \quad (2.56)$$

де K_M - кратність максимального моменту двигуна;

$K_U = U_1 / U_H$ – коефіцієнт, що враховує зниження напруги;

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

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

При використанні в якості ТЕД мотоблока ДПС послідовного збудження, у якого $M_{II} = M_{max}$, умова (2.56) виконується.

Перевірка ТЕД за умовами перевантаження. Перевірка перевантажувальної здатності ТЕД мотоблока проводиться за умовою [126]

$$M_{max} = M_H \cdot K_M \cdot K_U^2 \geq (1,2...1,3)M_{Cmax}, \quad (2.57)$$

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

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

Перевірка ТЕД за умовами нагріву. Втрати енергії в елементах електроприводу пов'язані з виділенням теплоти і їх нагріванням.

Практично всі елементи силового каналу електропривода мотоблока (рис. 2.4) 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 нагрів ізоляції і

термін її служби менше заданого, то такий режим за умовами нагріву є допустимим. В цьому випадку теплові втрати потужності ΔP_T постійні і після перехідного періоду нагрівання елементів каналу встановлюється постійна температура θ_g , що дорівнює

$$\theta_g = \theta_{н.с.} + \tau, \quad (2.58)$$

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

τ – перевищення температури елемента, що розглядається над температурою навколишнього середовища.

Величина τ пропорційна потужності теплових втрат ΔP_T і обернено пропорційна тепловіддачі A , Вт/°С

$$\tau = \Delta P_T / A. \quad (2.59)$$

При $\theta = const$ зв'язок між робочою температурою і темпом зносу ізоляції характеризується графіками терміну служби ізоляції $T(\theta)$, наведеними на рис. 2.7. При цьому зручно ввести і використовувати в подальшому характеристику швидкості зносу ізоляції при даній температурі $d(\theta) = T(\theta)$. Характер такої залежності (рис. 2.8) 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

$$d(\theta + 10^{\circ}C) \cong 2d(\theta_n). \quad (2.60)$$

Для статичного температурного режиму рівняння (2.58) з урахуванням (2.59) набуде вигляду

$$\theta = \theta_{о.с.} + \tau = \theta_{о.с.} + \Delta P_T / A = const. \quad (2.61)$$

Для електроприводу мотоблока 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 [123]

$$d_n \geq d_{cp} = d \left(\theta_{o.c.} + \frac{\Delta P_{cp}}{A} \right). \quad (2.62)$$

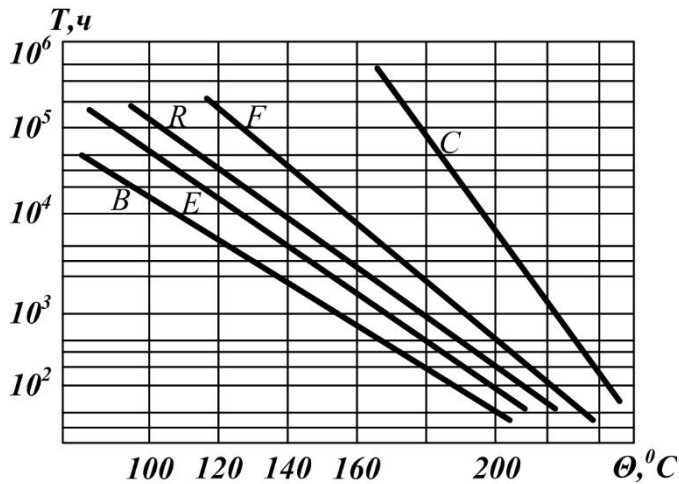


Рисунок 2.7 - Залежності терміну служби різних класів ізоляції від робочої температури

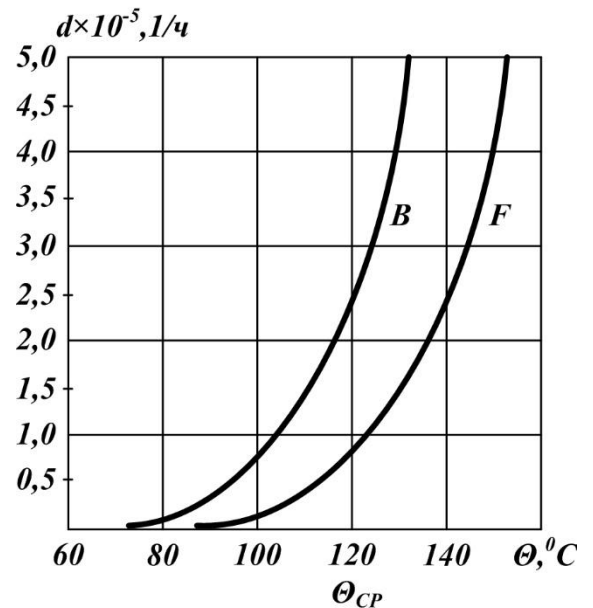


Рисунок 2.8 - Залежність швидкості старіння ізоляції від температури ($d=1/T$)

Якщо (2.62) розглядати у формі рівності, то це буде умова повного завантаження двигуна за умовами нагріву. Крім того співвідношення (2.62) означає, що режим виділення втрат для якого виконується рівність, є еквівалентним номінальному режиму для якого розраховується ТЕД за критерієм терміну його служби.

Співвідношення (2.62) 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 (2.62) випливає, що ці два режими будуть еквівалентні якщо певні для кожного з них швидкості старіння ізоляції d_{cp} дорівнюватимуть.

2.4 Оцінка потенційно-комутаційних умов на колекторі тягового ДПС привода електромоблока

З практичної точки зору важливо, щоб комутація ДПС при роботі проходила без іскріння щіток на колекторі, так як сильне іскріння призведе до псування робочої поверхні колектора і швидкого зносу щіток, а значить до скорочення терміну служби двигуна. Якість комутації по Стандарту оцінюється ступенем іскріння або класом комутації. У фізичних одиницях ступінь іскріння щіток оцінюється також середньої питомою потужністю $P_{nut.}$ виділяється в дуговому розряді під краєм щітки [52].

Середня питома потужність, що виділяється в дуговому розряді під краєм щітки

$$P_{nut.} = W_i V_a / (l_{щ} \cdot t_1), \quad (2.63)$$

де W_i – енергія імпульсу спалаху дугового розряду;

V_a – лінійна швидкість на поверхні якоря;

t_1 – зубцевий розподіл якоря.

При цьому

$$W_i = \frac{1}{2} L_{рез.} I_{зал.}^2, \quad (2.64)$$

де $L_{рез.}$ – результуюча індуктивність одночасно комутуючих секцій обмотки якоря;

$I_{зал.}$ – залишковий струм в секції, що розривається щіткою.

Крім питомої потужності $P_{nut.}$ потенційно-комутаційні умови на колекторі оцінюються наступними кількісними показниками:

– середнім значенням напруги між сусідніми колекторними пластинами ($U_{к.ср.}$);

– середнім значенням реактивної ЕРС в комутованій секції обмотки якоря ($e_{р.ср.}$);

– коефіцієнтом спотворення магнітного поля в зазорі машини під дією реакції якоря (k_f).

Найбільш напруженим по потенційно-комутаційним умовам є режим роботи ДПС з реалізацією номінальної потужності при пуску і максимальній швидкості (характеристика $M(\omega)$, рис. 2.3), коли реактивна ЕРС e_p і напруга між колекторними пластинами U_k досягають своїх максимальних значень.

Потенційні обмеження на колекторі визначаються максимально допустимою напругою між сусідніми колекторними пластинами $U_{k\ max}$ і коефіцієнтом спотворення поля в зазорі реакцією якоря K_f [68].

При цьому

$$U_{k\ max} = U_{k\ ср} \cdot K_f / \alpha_\delta; \quad (2.65)$$

або

$$U_{k\ max} = 2B_{\delta\ max} l_a \cdot V_a \cdot W_c (p / a), \quad (2.66)$$

де $B_{\delta\ max}$ – максимальна індукція в зазорі;

l_a – довжина провідника обмотки якоря в магнітному полі;

V_a – швидкість точки, що лежить на поверхні якоря;

W_c – число витків в секції обмотки якоря;

p – число пар полюсів двигуна;

a – число паралельних витків обмотки якоря;

α_δ – коефіцієнт полюсного перекриття.

При цьому по (2.65)

$$\begin{aligned} U_{k\ ср} &= 2p \cdot U / K = \alpha_\delta U_{k\ max} / k_f; \\ k_f &= B_{\delta\ max} / B_{\delta 0}, \end{aligned} \quad (2.67)$$

де U – напруга, що подається на обмотку якоря;

K – число колекторних пластин;

$B_{\delta 0}, B_{\delta\ max}$ – магнітна індукція в зазорі при холостому ході і при навантаженні під краєм головного полюса двигуна;

$U_{k\ max}$ – максимальна напруга між колекторними пластинами;

При проектуванні ДПС зазвичай приймається $U_{к\text{сер.}} = 14 \dots 18 \text{ В}$ і $\alpha_\delta = 0,67$, що без урахування дії реакції якоря виключає виникнення при роботі двигуна електричних розрядів і електричних дуг між колекторними пластинами [52].

При переході від номінального режиму роботи двигуна до режиму максимальної швидкості (ω_{max}) значення $U_{к\text{max}}$ зростає, що може спричинити виникнення кругового вогню на колекторі. Тому на допустиму величину $U_{к.\text{доп.}}$ вводяться наступні обмеження: для ДПС середньої потужності $U_{к.\text{доп.}} = 30 \dots 35 \text{ В}$ і для ДПС малої потужності $U_{к.\text{доп.}} = 40 \dots 45 \text{ В}$.

Для машин з рівномірним зазором без компенсаційної обмотки коефіцієнт спотворення поля

$$k_f = 1 + 1 / K_{\text{ст.}}, \quad (2.68)$$

де $K_{\text{ст.}}$ – коефіцієнт стійкості магнітного поля.

При цьому

$$K_{\text{ст.}} = F_{\text{з.п.}} / F_{\text{р.а.}}, \quad (2.69)$$

де $F_{\text{з.п.}}, F_{\text{р.а.}}$ – МРС головного полюса і реакції якоря.

Важливу роль для оцінки потенційно-комутаційних умов грає і вимога забезпечення мінімального значення коефіцієнта стійкості по (2.69). При відомих параметрах ДПС $U_{к\text{сп}}$ і $U_{к\text{max}}$ можна визначити максимальний коефіцієнт спотворення поля

$$k_{f\text{max}} = (U_{к\text{max}} / U_{к\text{сп}}) \alpha_\delta, \quad (2.70)$$

та мінімальний коефіцієнт стійкості при рівномірному зазорі машини

$$k_{\text{ymin}} = 1 / (k_{f\text{max}} - 1). \quad (2.71)$$

Для тягових ДПС малої і середньої потужності обмеження щодо потенційних умов зводиться до того, щоб зберегти мінімально допустимий коефіцієнт стійкості, який повинен бути $K_{\text{ст. min}} \geq 1$. У ДПС послідовного збудження таке обмеження виконується автоматично, якщо зафіксувати максимально допустимий ступінь ослаблення струму збудження $\beta_{\text{o.n.}} = 0,4$,

тобто мінімальний опір $R_{ш}$, який шунтує обмотку збудження, при якому $\beta_{o.n.min} = 0,4$.

Обмеження за умовами комутації визначаються електромагнітними причинами іскріння щіток, які пов'язані зі співвідношеннями середніх значень реактивної ЕРС $e_{p.cер.}$ і комутаційної ЕРС $e_{к.cер.}$ в коматованих секціях обмотки якоря, а також величиною питомої потужності розряду під щітками $P_{нит.}$.

Середнє значення ЕРС $e_{p.cер.}$ і $e_{к.cер.}$ визначаються за рівняннями [68],

$$e_{p.cер.} = 2A \cdot l_a \cdot V_a \cdot W_c \cdot \Lambda_{\Pi} (p/a); \quad (2.72)$$

$$e_{к.cер.} = 2B_{к.cер.} \cdot l_a \cdot V_a \cdot W_c \cdot \Lambda_{\Pi} (p/a), \quad (2.73)$$

де A – лінійне навантаження;

p – число пар полюсів;

Λ_{Π} – питома магнітна провідність;

$B_{к.cер.}$ – середнє значення магнітної індукції в зоні комутації, створюваної потоком додаткових полюсів машини.

Найбільш напруженим по комутаційно-потенційним умовам є режим роботи ДПС з реалізацією номінальної потужності при швидкості $\omega = \omega_{max}$, коли реактивна ЕРС і напруга між колекторними пластинами $U_{к.}$, а також лінійні швидкості на поверхні якоря V_a і колектора $V_{к.}$ досягають своїх максимальних значень. Тому в даному режимі гранично допустимі значення зазначених величин знаходяться в наступних межах: $e_{p.дон.} = 7,5 \dots 8,5B$, $V_{a.дон.} = 65 \dots 75 м / с$; $V_{к.дон.} = 50 \dots 55 м / с$. Небезпечного іскріння під щітками на колекторі ДПС не виникає, якщо питома потужність дугового розряду $P_{нит.} = 1 Вт / см$. Таким чином, обмеження по комутаційно-потенційним умовам ТЕД постійного струму, визначаються наступними співвідношеннями: $U_{кmax} \leq 30..35B$ в ДПС середньої потужності; $U_{кmax} \leq 40..45B$ в ДПС малої потужності; $V_{a.дон.} = 65 \dots 75 м / с$; $V_{к.дон.} = 50 \dots 55 м / с$. [52,68].

2.5 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 ω_* . Основна вимога до формування і вибору характеристик регулювання полягає в найбільш повному задоволенні наступних 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 ω_{max*} і максимального моменту M_{max*} при найменшому значенні напруги U_* і мінімально допустимому значенні магнітного потоку Φ_{min*} ;
- отримання характеристик регулювання $U_*(\omega_*)$, $\Phi_*(\omega_*)$ або $U_*(I_*)$, $\Phi_*(I_*)$ за допомогою порівняно простих за конструкцією і керуванням вентильних перетворювачів з високою експлуатаційною надійністю, малими габаритами і вартістю.

Характеристики регулювання ТЕД можуть бути граничними і частковими. Під граничними характеристиками будемо розуміти характеристики регулювання ТЕД постійного струму, що забезпечують в робочому діапазоні навантажень і швидкостей ω_* реалізацію сталості споживаної потужності ($P_{1*} = 1$). Часткові характеристики регулювання формуються для реалізації навантажень менше номінальних при $P_{1*}' < P_{1*} = 1$.

Умови регулювання ДПС визначаються вимогами тягової механічної характеристики $M_*(\omega_*)$ на всіх інтервалах зміни кутової швидкості:

підтримання $P_{1*} = 1$, забезпечення значення пускового моменту M_{II*} і пускового струму $I_* = I_{max*}$ і т.і.

При цьому гранична механічна характеристика $M_*(\omega_*)$, яка визначає закон регулювання ТЕД має три основних ділянки (рис. 2.9):

AB – сталості пускового моменту $M_* = M_{max*} = M_{II*}$;

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

DE – обмеження кутової швидкості $\omega_* \leq \omega_{max*}$.

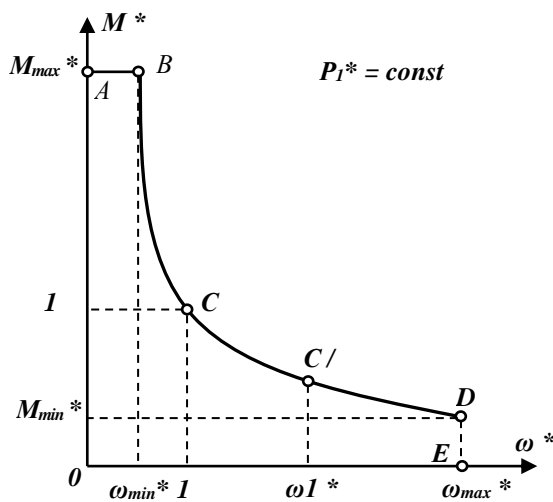


Рисунок 2.9 - Механічна характеристика $M_*(\omega_*)$ тягового

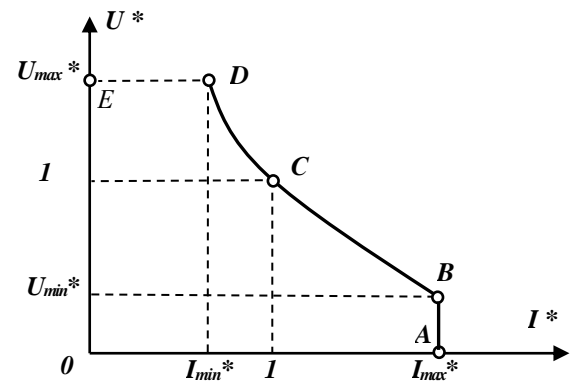


Рисунок 2.10 – Залежність $U_*(I_*)$ тягового електродвигуна

Характеристики регулювання напруги $U_*(I_*)$ або $U_*(\omega_*)$ можуть бути отримані на підставі рівнянь (2.12) і (2.13) рівноваги напруг в точках В і D граничної механічної характеристики $M_*(\omega_*)$, раніше отриманої і розглянутої в п. 2.1, наведені на рис. 2.10. Розділивши зліва і справа рівняння (2.12) і (2.13) на номінальну напругу, отримаємо

$$U_{min*} = a\Phi_{B*} \cdot \omega_{B*} + \epsilon \frac{K_M}{\Phi_{B*}}; \quad (2.74)$$

$$U_{max*} = aK_\omega \cdot \Phi_{D*} + \epsilon \frac{M_{min}}{\Phi_{D*}}, \quad (2.75)$$

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 (2.6), (2.7) і (2.3) отримаємо

$$U_{min*} = a\Phi_{B*} \cdot \omega_{min*} + eI_{max*}; \quad (2.76)$$

$$U_{max*} = a\Phi_{D*} \cdot \omega_{max*} + eI_{min*}. \quad (2.77)$$

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

$$U_* = a\Phi_* \cdot \omega_* + eI_*. \quad (2.78)$$

Характеристику регулювання потоку $\Phi_*(\omega_*)$ отримаємо з рівняння (2.78) з урахуванням того, що за (2.8) $I_* = 1/U_*$ і вирішивши його відносно потоку Φ_*

$$\Phi_* = \frac{U_*^2 - e}{a\omega_* \cdot U_*}. \quad (2.79)$$

Характеристики регулювання потоку в функції струму I_* будуть мати вигляд

$$\Phi_* = \Phi_*(I_*); \Phi_* = \Phi_*(\beta_{оп} \cdot I_*). \quad (2.80)$$

Відмінною особливістю регулювання магнітного потоку ДПС послідовного збудження є та обставина, що у таких двигунів струм збудження $I_{зб.} = I_a$, Тому магнітний потік цих двигунів зазвичай послаблюється шляхом включення регулювального реостата $R_{ш}$ паралельно послідовній обмотці збудження, тобто її шунтуванням (рис. 2.11, а), внаслідок чого струм збудження двигуна визначиться співвідношенням

$$I_{зб.} = I_a R_{ш} / (R_{зб.} + R_{ш}) = \beta_{оп} I_a, \quad (2.81)$$

де $R_{ш}; R_{зб.}$ - опір шунтуючого реостата і послідовної обмотки збудження;

$\beta_{оп}$ - коефіцієнт ослаблення поля.

При цьому

$$\beta_{оп} = I_{зб.} / I_a = R_{ш} / (R_{зб.} + R_{ш}). \quad (2.82)$$

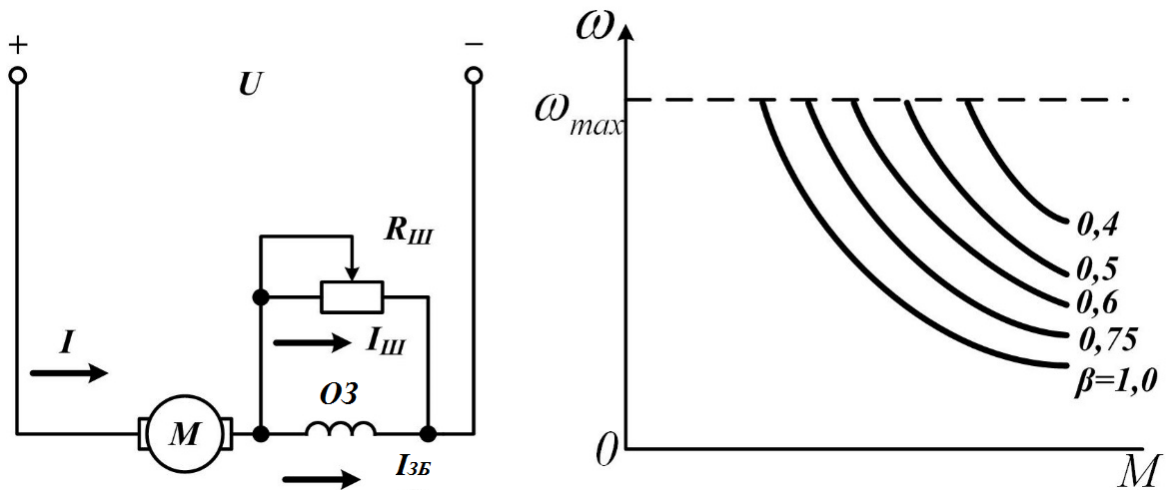


Рисунок 2.11 - Регулювання швидкості ДПС послідовного збудження зміною магнітного потоку: а – схема; б – характеристика $\omega(M)$

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 $\omega_{max} / \omega_{min} = 2...3$. Нижня межа, як зазначалося, обмежується насиченням магнітного кола машини, яка не дозволяє значно збільшувати магнітний потік. Верхня межа ω_{max} визначається умовами стійкості (при сильному зменшенні $I_{зб}$ двигун йде в рознос), а також обмеженнями за умовами комутації [52]. 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 $\beta_{оп} = 0,4$ (рис. 2.11, б). Оцінимо можливість формування характеристик регулювання $U_*(\omega_*)$ і $\Phi_*(I_*)$, що забезпечують раціональне регулювання ТЕД постійного струму в приводі мотоблока відповідно до першого критерія раціонального регулювання, що передбачає отримання максимального ККД двигуна.

Відомий загальний закон оптимального регулювання електричних машин, в сенсі забезпечення мінімальних втрат і максимального електромагнітного ККД [56], згідно якого параметри регулювання U_* і Φ_* повинні бути пов'язані з моментом M_* наступними співвідношеннями

$$U_* = \sqrt{M_*}; \quad (2.83)$$

$$\Phi_* = E_* / \omega_* = \sqrt{M_*}. \quad (2.84)$$

Розглянемо, наскільки раціональним є регулювання частоти обертання потоком Φ_* по (2.84) для тягового ДПС на основних ділянках граничної механічної характеристики $M_*(\omega_*)$ (рис. 2.9). На ділянці ABC в інтервалі зміни кутової швидкості $0 \leq \omega_* \leq 1$ при $\omega_* < 1$, момент $M_* > 1$. Максимальний пусковий момент ДПС послідовного збудження 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 по (2.84) в даному інтервалі кутових швидкостей неприйнятно.

Оцінимо можливість регулювання потоком по (2.84) на ділянці CD характеристики $M_*(\omega_*)$ з інтервалом зміни кутової швидкості $1 \leq \omega_* \leq \omega_{max*}$. Для цього визначимо залежність між ЕРС E_* і швидкістю ω_* . З цією метою помножимо зліва і справа співвідношення (2.84) на $\sqrt{\omega_*}$. В результаті отримаємо

$$E_* / \sqrt{\omega_*} = \sqrt{M_* \cdot \omega_*} = \sqrt{P_{EM*}}. \quad (2.85)$$

де P_{EM*} - електромагнітна потужність ДПС.

Отримання максимальної швидкості ω_{max*} на ділянці CD забезпечується ослабленням потоку при підтримці сталості напруги U_{max*} . Ступінь ослаблення потоку $\Phi_{D.min*}$ обмежується насамперед потенційно-комутаційними умовами на колекторі ДПС. 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 $\Phi_{D.min*} = 0,3...0,4$.

В першому наближенні (нехтуючи втратами в колі якоря $\Delta P_{a*} \cong 0$), можна прийняти потужності $P_{EM*} = P_{1*} = const$. Тоді для граничної характеристики регулювання, де забезпечується $P_{1*} = 1$, рівняння (2.83) і (2.84) приймуть вид

$$\Phi_* = 1 / \sqrt{\omega_*}; \quad (2.86)$$

$$U_{max*} \cong E_{max*} = \sqrt{\omega_*}. \quad (2.87)$$

З рівняння (2.87) випливає, що зі збільшенням $\omega_* > 1$, необхідно збільшувати напругу $U_* = U_{max*}$ і знижувати коефіцієнт $\beta_{оп} = 0,3...0,4$. Оцінка раціональності регулювання Φ_* 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 ω_{1*} - кутова швидкість відповідна режиму роботи ДПС з $U_* = U_{max*}$ і $\beta_{оп} = 1$, при яких комутаційні умови на колекторі нормальні і відповідають швидкості $\omega_{1*} \leq 2$.

Отже, на ділянці $1 \leq \omega_* \leq \omega_{1*}$ регулювання можна характеризувати як раціональне. Значення швидкості ω_{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 $U_{max*} = 1,2...1,3$ і $\Phi_* = 0,3...0,4$.

Таким чином, регулювання магнітного потоку Φ_* відповідно до закону (2.84) і отриманих з нього співвідношень (2.86) і (2.87) можна використовувати тільки в обмеженому інтервалі кутових швидкостей ДПС, а саме $1 \leq \omega_* \leq \omega_{1*}$. В іншому діапазоні кутових швидкостей механічної характеристики $M_*(\omega_*)$ його застосування не забезпечує умовам раціонального регулювання з урахуванням першого критерію.

2.6 Аналіз режимів керування тягового електродвигуна постійного струму електромоблока

Режим керування ТЕД визначається сукупністю характеристик регулювання і умов регулювання для кожного інтервалу кутових швидкостей механічної характеристики $M_*(\omega_*)$ двигуна (рис. 2.10). Відповідно до цього розглянемо формування характеристик регулювання і умови регулювання на основних ділянках граничної механічної характеристики $M_*(\omega_*)$ з використанням побудованої на її основі характеристики $U_*(I_*)$, а також отриманих рівнянь характеристик регулювання (2.74) ... (2.81).

В інтервалі швидкостей $0 \leq \omega_* \leq \omega_{min*}$ характеристика регулювання визначається умовами забезпечення необхідного пускового моменту $M_{П*} \geq 2...3$, створюваного пусковим струмом $I_{П*}$ і магнітним потоком $\Phi_{П*}$. Для ДПС послідовного збудження при коефіцієнті ослаблення поля збудження $\beta_{оп} = 1$ необхідне підтримання сталості пускового струму $I_{П*} = 2...3$, що створює магнітний потік з урахуванням насичення магнітного кола двигуна рівний $\Phi_{П*} = 1,1...1,25$, тобто характеристики регулювання при цьому мають вид

$$\Phi_{П*} = \Phi_*(I_{П*}); \Phi_{П*} = \Phi_*(\beta_{оп*} \cdot I_{П*}); \quad (2.88)$$

$$U_{min*} = a\Phi_{П*}\omega_{min*} + eI_{П*}. \quad (2.89)$$

В інтервалі кутових швидкостей $\omega_{min*} \leq \omega_* \leq 1$ основною умовою регулювання є $P_{I*} = 1$, а додаткові умови регулювання залежать від типу системи збудження двигунів постійного струму. Для ДПС послідовного збудження

$$I_* = I_*(\omega_*) \text{ і } \beta_{оп} = 1; \quad (2.90)$$

При прийнятій умові регулювання $I_* = I_*(\omega_*)$ струм змінюється в функції ω_* від значення $I_{Пmax}$ до $I_* = 1$, а потік змінюється в функції струму якоря I_* . Характеристики регулювання ДПС послідовного збудження набувають вигляд

$$\Phi_* = \Phi_*(I_*); U_* = 1 / I_*. \quad (2.91)$$

Таблиця 2.1

Режими керування тяговими ДПС привода електромоблока

Інтервали кутових швидкостей	Умови регулювання	Характеристики регулювання	Режими керування
$0 \leq \omega_* \leq \omega_{min*}$	$M_* = M_{II*} = 2...3$ $I_* = I_{II*} = 2...3$ $\beta_{OII} = 1$	$\Phi_{II*} = \Phi_{II*}(I_{II*})$ $U_{min*} = a\Phi_{II*}\omega_{min*} + \epsilon I_{II*}$	1
$\omega_{min*} \leq \omega_* \leq 1$	$P_{I*} = 1$ $I_* = I_*(\omega_*)$ $\beta_{OII} = 1$	$\Phi_* = \Phi_*(I_*)$ $U_* = 1 / I_*$	2
$1 \leq \omega_* \leq \omega_{max*}$	$P_{I*} = 1$ $\beta_{OII} = \beta_{OII}(I_*)$	$\Phi_* = \frac{U_{max}^2 - \epsilon}{a - \omega_{max*} U_{max*}}$ $U_* = U_{max*}$	3

В інтервалі кутових швидкостей $1 \leq \omega_* \leq \omega_{max*}$ основною умовою регулювання залишається $P_{I*} = 1$ для ДПС всіх типів систем збудження, а також при $\beta_{OII} = 1$ для ДПС послідовного збудження. Струм збудження $\Phi_{3\delta*}(\omega_*) = F_{3\delta*}(\omega_*)$ такого двигуна визначається по кривій намагнічування $\Phi_*(F_{B*})$ (рис. 2.13). Характеристика $F_*(\omega_*)$ розглядається за допомогою залежності (2.79) $\Phi_*(\omega_*)$ і кривої намагнічування двигуна.

В даному інтервалі кутових швидкостей, характеристики регулювання після підстановки в (2.79) $U_* = U_{max*}$; $\omega_* = \omega_{max*}$ приймуть вид

$$\Phi_* = \frac{U_{max}^2 - \epsilon}{a - \omega_{max*} U_{max*}}; U_* = U_{max*}. \quad (2.92)$$

Таким чином, для кожного інтервалу кутових швидкостей відповідних тяговій характеристиці $M_*(\omega_*)$ мотоблока з приводним ДПС режим керування залежить від прийнятих умов регулювання $I_* = I_{II*}; P_{I*} = 1; \beta_{OII} = 1; I_{3\delta*} = 1$, а також характеристик регулювання $\Phi_{II*} = \Phi_*(I_{II*}); \Phi_{II*} = \Phi_*(I_*, I_{3\delta*}); U_* = 1 / I_*; U_{min*} = a\Phi_{II*} \cdot \omega_{min*} + \epsilon I_{II*}$ та ін.

В таблиці 2.1 систематизовані умови регулювання і характеристики регулювання, що визначають режими керування на основних ділянках зміни кутових швидкостей для ДПС послідовного збудження. Дані таблиці 2.1 свідчать про те, що весь діапазон швидкостей відповідно до механічної характеристики $M_*(\omega_*)$ реалізується поєднанням трьох режимів керування. При цьому пускові режими двигуна забезпечуються при зниженій напрузі U_{min*} і повному магнітному потоці $\beta_{оп} = 1; I_{зб*} = 1$, а отримання швидкостей, що перевищують номінальну ($\omega_{max*} > 1$) досягається збільшенням напруги $U_{max*} > 1$ і ослабленням магнітного потоку $\beta_{оп} < 1; I_{зб*} < 1$. Обидва способи керування напругою $U_*(\omega_*)$ і магнітним потоком $\Phi_*(\omega_*)$ використовуються або одночасно, або по чергово. Відзначимо, що в залежності від значення параметрів ω_* або I_* втрати в ДПС будуть різними. Тому виникає необхідність визначення допустимих значень U_{max*} і складання таких програм керування магнітним потоком, які забезпечують регулювання ДПС з мінімальними втратами і максимальним спрощенням пристрою керування стосовно кожного інтервалу кутових швидкостей ДПС згідно механічної характеристики. Питання зниження витрат електроенергії особливо актуальна при експлуатації мотоблоків з ТЕД, призначених для роботи в теплицях, на присадибних і дачних ділянках і живленні від малопотужної мережі.

2.7 Розрахунок часткових характеристик регулювання ТЕД електромоблока

Часткові характеристики регулювання ДПС повинні забезпечувати реалізацію часткових тягових характеристик мотоблока (рис. 2.2). Параметри ДПС при використанні потужності $P_{li*} < 1$ є функцією як потужності P_{li*} , так і кутової швидкості ω_* . Тому для розрахунку часткових характеристик регулювання необхідно для кожного значення потужності P_{li*} визначити

значення пускового струму $I_{\Pi i^*}$ і напруги $U_{max i^*}$. Для цього скористаємося залежністю $U_*(I_*)$, отриманою з граничної механічної характеристики $M_*(\omega_*)$, рівнянням (2.4) ДПС і характеристикою, наведеною на рис. 2.10 (крива ABCDE). Часткові характеристики $U_*(I_*)$, розташовуються усередині області, утвореної кривою ABCDE і осями координат. Розглянемо формування часткових характеристик графічним шляхом відповідно (рис. 2.12.)

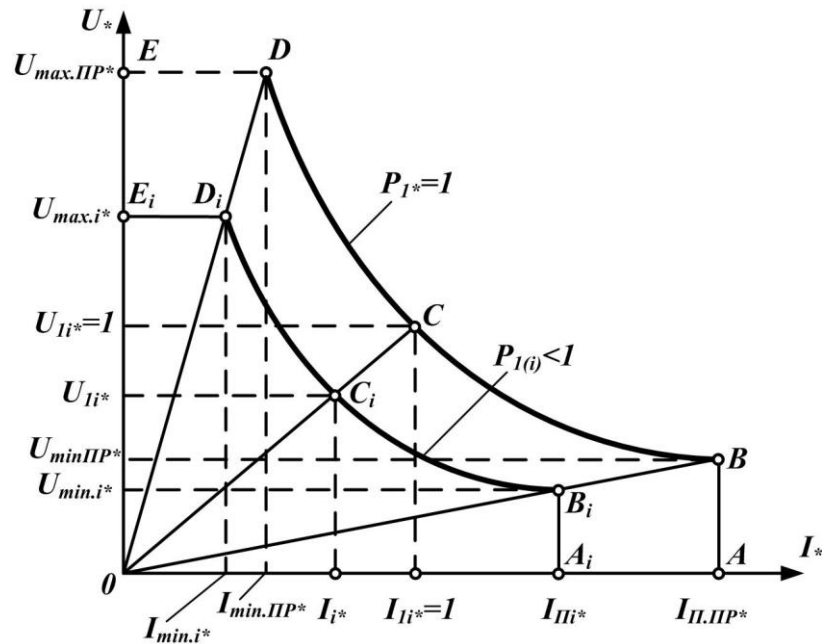


Рисунок 2.12 - Сімейство залежностей $U_*(I_*)$, що пояснюють принцип формування часткових характеристик ДПС привода електромоблока

Значення пускових струмів $I_{\Pi i^*}$ і максимальних напруг $U_{max i^*}$ при $P_{1i^*} < 1$ визначаються графічно за допомогою променів $0B$ і $0D$, проведених з початку координат в точки B і D граничної характеристики $U_*(I_*)$. Точки перетину променю $0B$ з кривою $BiCiDi$ дають значення струму $I_{\Pi i^*}$ і напруги $U_{max i^*}$ при потужності $P_{1i^*} < 1$, а точки перетину променю $0D$ з цією ж кривою значення $I_{min i^*}$ і $U_{max i^*}$. Визначимо співвідношення між зазначеними параметрами двигуна, вважаючи на ділянці $BiCiDi$ $P_{1i^*} = const$, споживана потужність

$$P_{1np.i^*} = U_{max.np.i^*} \cdot I_{min.np.i^*} = U_{\Pi.np.i^*} \cdot I_{\Pi.np.i^*}; \quad (2.93)$$

$$P_{Ii^*} = U_{max.i^*} \cdot I_{min.i^*} = U_{\Pi.i^*} \cdot I_{\Pi.i^*}. \quad (2.94)$$

З подоби трикутників $0AB$ і $0AiBi$; $0ED$ і $0EiDi$, відповідно маємо

$$U_{\Pi.np^*} / I_{\Pi.np^*} = U_{\Pi.i^*} / I_{\Pi.i^*}; \quad (2.95)$$

$$U_{max.np^*} / I_{max.np^*} = U_{max.i^*} / I_{\Pi.i^*}. \quad (2.96)$$

Розділивши (2.94) на (2.95), отримаємо

$$P_{Ii^*} = \frac{U_{\Pi.i^*} \cdot I_{\Pi.i^*}}{U_{\Pi.np^*} \cdot I_{\Pi.np^*}}; \quad (2.97)$$

$$P_{Ii^*} = \frac{U_{max.i^*} \cdot I_{min.i^*}}{U_{max.np^*} \cdot I_{min.np^*}}. \quad (2.98)$$

На підставі (2.95) ... (2.98), отримаємо співвідношення для визначення поточних значень параметрів часткових характеристик в функції потужності P_{Ii^*}

$$U_{\Pi i^*} = U_{\Pi.np^*} \sqrt{P_{Ii^*}}; \quad (2.99)$$

$$I_{\Pi i^*} = I_{\Pi.np^*} \sqrt{P_{Ii^*}}; \quad (2.100)$$

$$U_{max.i^*} = U_{max.np^*} \sqrt{P_{Ii^*}}; \quad (2.101)$$

$$I_{min.i^*} = I_{min.np^*} \sqrt{P_{Ii^*}}. \quad (2.102)$$

Розглянемо формування функціональних залежностей, що визначають часткові характеристики регулювання на основних ділянках зміни кутових швидкостей ДПС послідовного збудження. У режимі пуску на ділянці $AiBi$ (рис. 2.12), що відповідає режиму керування 1 в таблиці 2.1, магнітний потік ДПС визначається пусковим струмом, який розраховується по (2.100). Рівняння часткової характеристики отримаємо по (2.89) з урахуванням (2.100)

$$U_{min^*} = a\Phi_{\Pi^*}\omega_{min^*} + \varepsilon I_{\Pi.np^*} \sqrt{P_{Ii^*}}. \quad (2.103)$$

Поточні значення потужності, електромагнітного моменту і потоку ДПС, відповідають ділянкам $AiBi$, на інтервалі кутових швидкостей $0 \leq \omega_* \leq \omega_{min^*}$ визначаються

$$P_{Ii^*} = (\omega_*) = U_*(\omega_*) \cdot I_{\Pi^*}; \quad (2.104)$$

$$M_*(\omega_*) = \Phi_{II*} \cdot I_{II*}; \quad (2.105)$$

$$\Phi_{II*}(\omega_*) = \Phi_{II*}(I_{II*}), \beta_{оп} = 1. \quad (2.106)$$

Гранична кутова швидкість ω_{min*} переходу двигуна з режиму керування 1 в режим 2 визначається по (2.103)

$$U_{min*} = \frac{U_{min*} - \epsilon I_{II*} \sqrt{P_{II*}}}{a \Phi_{II*}}. \quad (2.107)$$

Визначимо поточні значення струму I_{II*} і напруги U_{II*} в функції потужності P_{II*} , відповідні точкам Ci (рис. 2.12). Точки Ci визначають верхню граничну швидкість в режимі керування 2 з інтервалом кутових швидкостей $\omega_{min*} \leq \omega_* \leq 1$ (табл. 2.1). Відзначимо, що в точці з граничною характеристики $U_*(I_*)$ потужність $P_{I*} = 1$ і струм $I_* = I_{I*} = 1$, напруга $U_* = U_{I*} = 1$. З урахуванням прийнятих позначень

$$P_{IIP*} = 1 = U_{I*} \cdot I_{I*}; \quad (2.108)$$

$$P_{II*} = U_{II*} \cdot I_{II*}. \quad (2.109)$$

З подоби трикутників $0CH$ і $0CiHi$ отримаємо

$$U_{I*} / I_{I*} = U_{II*} / I_{II*} = 1; \quad (2.110)$$

Розділивши (2.109) на (2.108) отримаємо

$$P_{II*} = \frac{U_{II*} \cdot I_{II*}}{U_{I*} \cdot I_{I*}}. \quad (2.111)$$

З урахуванням (2.110) і (2.111) маємо

$$P_{II*} = (I_{II*} / I_{I*})^2, \quad (2.112)$$

звідки

$$I_{II*} = I_{I*} \sqrt{P_{II*}} = \sqrt{P_{II*}}. \quad (2.113)$$

Визначивши значення I_{II*} і задаючись рядом значень струму якоря від I_{II*} до I_{I*} , можна розрахувати часткові характеристики регулювання ДПС в режимі керування 2 по методиці розрахунку граничних характеристик в тому ж режимі керування.

В режимі 3 з інтервалом кутових швидкостей $1 \leq \omega_* \leq \omega_{max*}$, рівняння напруги часткової характеристики, згідно (2.77), з урахуванням (2.102) набуде вигляду

$$U_{max*} = a\Phi_* \cdot \omega_{max*} + \epsilon I_{min.np*} \sqrt{P_{lI*}} \quad (2.114)$$

Магнітний потік

$$\Phi_* = \frac{U_{max}^2 - \epsilon}{a - \omega_{max*} U_{max*}} \quad (2.115)$$

або

$$\Phi_* = \Phi_{min*} = I_{min*} \cdot \beta_{оп} \cdot K_\mu \quad (2.116)$$

З урахуванням (2.102)

$$\Phi_* = I_{min.np*} \sqrt{P_{lI*}} \cdot \beta_{оп} \cdot K_\mu, \quad (2.117)$$

де K_μ - коефіцієнт насичення ДПС (рис. 2.13).

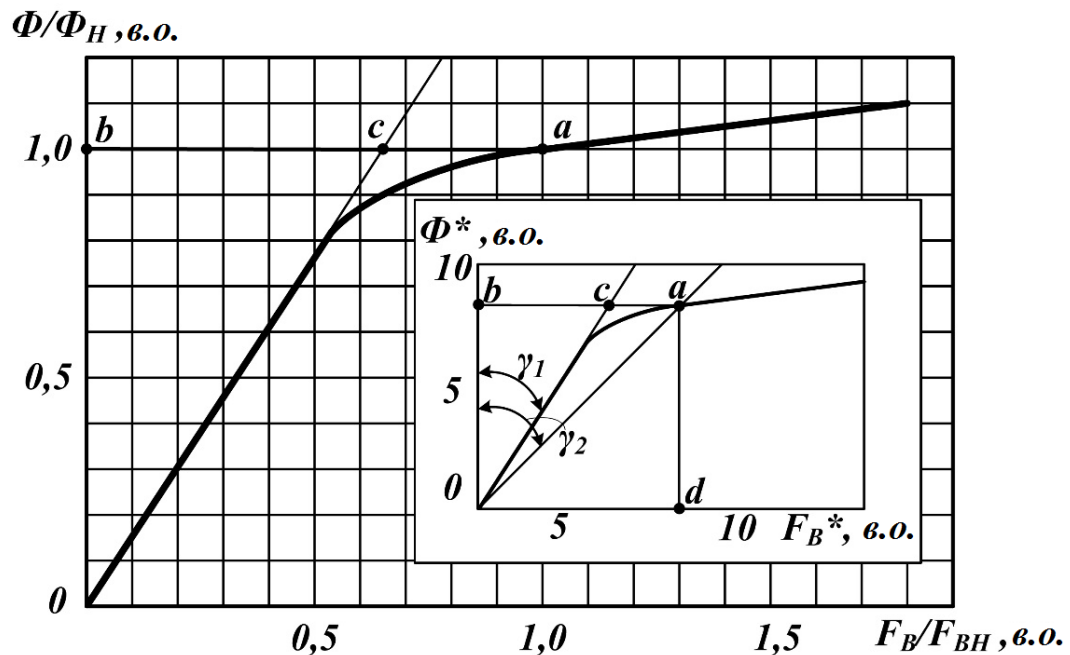


Рисунок 2.13 - Універсальна магнітна характеристика ДПС

Кутова швидкість ω_{max*} в режимі керування 3 визначається з (2.114)

$$\omega_{max*} = \frac{U_{max*}^2 - \epsilon}{a\Phi_* \cdot U_{max*}} \quad (2.118)$$

Для потужності $P_{1*} < 1$ потенційно-комутаційні обмеження відсутні, оскільки зі зменшенням потужності P_{1*} і при незмінній кутовій швидкості ω_{max*} значення напруги між колекторними пластинами U_k і реактивна ЕРС e_p знижуються.

2.8 Обґрунтування оптимального режиму керування тяговим ДПС електромоблока по максимуму ККД

При розгляданні ККД тягового ДПС були приведені розрахункові рівняння для визначення складових постійних втрат (2.36), (2.37) і (2.38) і складових змінних втрат (2.39) ... (2.42). З урахуванням цих рівнянь сумарні втрати ΔP_c по (2.43) і ΔP_v по (2.44) можна представити в розгорнутому вигляді

$$\Delta P_c = \Delta P_{MX.H} \cdot \omega_*^n + \Delta P_{MG.H} \cdot \omega_*^\beta \cdot \Phi^2 + \Delta P_{д.Н}; \quad (2.119)$$

$$\Delta P_v = \Delta P_{a.H} \cdot I_*^2 + \Delta P_{36.H} \cdot I_{36.*}^2 + \Delta P_{щ.Н} \cdot I_*^2, \quad (2.120)$$

де $\Delta P_{MX.H}$; $\Delta P_{MG.H}$; $\Delta P_{д.Н}$; $\Delta P_{a.H}$; $\Delta P_{36.H}$; $\Delta P_{щ.Н}$ - потужності окремих видів втрат при номінальному навантаженні.

Для оцінки сумарних втрат ΔP_c і ΔP_v , а також окремих втрат в двигуні, доцільно їх представити у вигляді відношення до сумарних номінальним втрат $\Delta P_{\Sigma H}$

$$\begin{aligned} \Delta P_{v*} &= \Delta P_{vH*} / \Delta P_{\Sigma H*}; \quad \Delta P_{c*} = \Delta P_{cH*} / \Delta P_{\Sigma H*}; \\ a_1 &= \Delta P_{MX.H} / \Delta P_{\Sigma H}; \quad a_2 = \Delta P_{MG.H} / \Delta P_{\Sigma H}; \quad a_3 = \Delta P_{д.Н} / \Delta P_{\Sigma H}; \\ a_4 &= \Delta P_{a.H} / \Delta P_{\Sigma H}; \quad a_5 = \Delta P_{36.H} / \Delta P_{\Sigma H}; \quad a_6 = \Delta P_{щ.Н*} / \Delta P_{\Sigma H}. \end{aligned} \quad (2.121)$$

При цьому

$$\Delta P_{\Sigma H} = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H}, \quad (2.122)$$

визначається за паспортними даними.

Рівняння втрат ΔP_c (2.119) і ΔP_v (2.120) з урахуванням (2.121) приймуть вид

$$\Delta P_{c^*} = a_1 \cdot \omega_*^n + a_2 \cdot \omega_*^\beta \cdot \Phi^2 + a_3; \quad (2.123)$$

$$\Delta P_{v^*} = a_4 \cdot I_*^2 + a_5 \cdot I_{3\phi,*}^2 + a_6 \cdot I_*^2. \quad (2.124)$$

Так як $I_* = M_* / \Phi_*$; $I_* = I / U_*$, то з урахуванням (2.82) змінні втрати в ДПС можна представити в функції потоку і напруги

$$\Delta P_{v^*} = a_4 \cdot M_*^2 / \Phi_*^2 + a_5 \cdot \beta_{оп}^2 M_*^2 / \Phi_*^2 + a_6 M_*^2 / \Phi_*^2; \quad (2.125)$$

$$\Delta P_{v^*} = a_4 \cdot 1 / U_*^2 + a_5 \cdot 1 / U_*^2 + a_6 \cdot 1 / U_*^2. \quad (2.126)$$

При роботі електроприводу задаються координати механічного руху M і ω , тому варіюваними змінними, що дозволяють змінити втрати, є напруга U_* і магнітний потік Φ_* , створюваний струмом $I_{3\phi,*}$ в обмотці збудження двигуна.

Зв'язок між магнітним потоком Φ_* і струмом $I_{3\phi,*}$ визначається кривою намагнічення (рис. 2.13) магнітного кола двигуна $\Phi_* = f(F_{3\phi,*})$. Якщо ДПС працює на лінійній ділянці кривої намагнічування, то $I_{3\phi,*} = \Phi_*$, і потік, при якому втрати мінімальні, визначаються з умови

$$d\Delta P_{\Sigma^*} / d\Phi_* = 0 \text{ або } d\Delta P_{c^*} / d\Phi_* = d\Delta P_{v^*} / d\Phi_*. \quad (2.127)$$

В загальному випадку (рис. 2.13), магнітний потік Φ_* є нелінійної функцією струму збудження

$$I_{3\phi,*} = \Phi_* / K_\mu, \quad (2.128)$$

де K_μ - коефіцієнт насичення магнітного кола ДПС, який визначається як тангенс кута нахилу прямої, що проходить через початок координат і точки на кривій намагнічування, що відповідає розглянутому режиму роботи ДПС.

Згідно кривої намагнічування в точці a коефіцієнт K_μ визначається як відношення відрізків або МРС

$$K_\mu = \frac{\overline{av}}{\overline{bc}} = \frac{F_{ax}}{F_{c^*}}. \quad (2.129)$$

Відповідно до (2.127) визначимо мінімальні сумарні втрати в ДПС при допущенні, що магнітний потік Φ_* лінійно залежить від струму збудження. Похідні по потоку від сумарних постійних втрат ΔP_{c^*} (2.123) і змінних ΔP_{v^*} (2.125) втрат дорівнюватимуть

$$d\Delta P_{c*} / d\Phi_* = 2a_2\Phi_*\omega_*^3; \quad (2.130)$$

$$d\Delta P_{v*} / d\Phi_* = 2a_4M_*^2 / \Phi_*^3 + 2a_5\beta_{OPT}^2 M_*^2 / \Phi_*^3 + 2a_6M_*^2 / \Phi_*^3. \quad (2.131)$$

При спільному рішенні рівнянь (2.127), (2.130) і (2.131) отримаємо значення потоку, при якому втрати в двигуні мінімальні для заданих значень M_* і ω_*

$$\Phi_{OPT*}^2 = M_* \sqrt{\frac{a_4 + a_5\beta_{OPT}^2 + a_6}{a_2\omega_*^\beta}}. \quad (2.132)$$

Сумарні втрати в двигуні для оптимального потоку отримаємо з (2.125) і (2.126) при виконанні умови (2.132):

$$\Delta P_{\Sigma min*} = 2M_* \sqrt{(a_4 + a_6)(a_5 + a_2\omega_*^\beta)} + a_1\omega_*^n. \quad (2.133)$$

В реальних умовах експлуатації тягових ДПС магнітний потік Φ_* є нелінійною функцією струму збудження I_{36*} (2.128), тому становить практичний інтерес визначення характеристик регулювання і умов регулювання, тобто режиму керування, що забезпечують мінімальні сумарні втрати в ДПС при реалізації закону регулювання $M_*(\omega_*)$ на всіх інтервалах значень кутових швидкостей. Тим більше, як це показано в попередніх дослідженнях (п. 2.5), закон оптимального регулювання електричних машин, визначається співвідношеннями (2.83) і (2.84) стосовно тягового ДПС, таке завдання не вирішує. Очевидно, що найбільш ефективним з енергетичної та практичної точки зору є режим керування ТЕД, що забезпечує найменші втрати або максимальний ККД при порівняно простій програмі і пристрої керування тяговим ДПС в приводі електромоблока.

Отримання рівнянь постійних втрат ΔP_{c*} (2.123) і змінних втрат ΔP_{v*} (2.126) у вигляді функціональних залежностей від основних параметрів регулювання ДПС - U_* і Φ_* , дозволяють обґрунтувати режим керування ТЕД мотоблока по максимуму ККД.

Згідно (2.47), умовою отримання максимального ККД ДПС є рівність постійних і змінних втрат, тобто

$$\beta_m^2 = \Delta P_{c*} / \Delta P_{v*}. \quad (2.134)$$

З урахуванням (2.123) і (2.124), вважаючи показники ступеня кутової швидкості ω_* $n = 1,5$ і $\beta = 1,5$, отримаємо

$$\beta_m^2 = \frac{a_1 \omega^{1.5} + a_2 \Phi_*^2 \omega^{1.5} + a_3}{a_4 \cdot 1_*^2 + a_5 \cdot I_{B*}^2 + a_6 \cdot I_*^2}, \quad (2.135)$$

або, так як $I_* = I / U_*$ (2.8) після підстановки з урахуванням (2.82)

$$\beta_m^2 = \frac{a_1 \omega^{1.5} + a_2 \Phi_*^2 \omega^{1.5} + a_3}{a_4 \cdot 1 / U_*^2 + a_5 \cdot 1 / U_*^2 \beta_{оп}^2 + a_6 \cdot 1 / U_*^2}, \quad (2.136)$$

де коефіцієнти $a_1 \dots a_6$ визначають співвідношення окремих видів втрат до сумарних втрат ДПС при номінальному навантаженні (2.121).

Як зазначалося, у сучасних ДПС послідовного значення β_m знаходиться в межах $\beta_m = 0,7 \dots 0,9$, що закладається при проектуванні двигунів і пояснюється найбільш імовірним тривалим завантаженням ДПС в умовах експлуатації.

Як зазначено в [53,58], коефіцієнти відносних втрат у ДПС послідовного збудження істотно різної потужності відрізняються незначно. Тому в розрахунках використовуємо усередненими значеннями $a_1 \dots a_6$:
 $a_{1(MX)} = 0,05 \dots 0,06$; $a_{2(MT)} = 0,1 \dots 0,3$; $a_{3(D)} = 0,05 \dots 0,1$; $a_{4(Ea)} = 0,45 \dots 0,5$;
 $a_{5(Eзб.)} = 0,17 \dots 0,19$; $a_{6(ш)} = 0,03 \dots 0,05$.

Рівняння (2.135) і (2.136) дозволяють оцінити як змінюється співвідношення постійних і змінних втрат $\Delta P_{c*} / \Delta P_{v*}$ тягового ДПС при зміні основних параметрів регулювання U_* і Φ_* , і визначити режим керування ТЕД по максимуму ККД.

Сумарні втрати в двигуні при забезпеченні максимального ККД дорівнюють

$$\Delta P_{\Sigma опт*} = \Delta P_{c*} + \beta_m^2 \Delta P_{v*}. \quad (2.137)$$

Напруга $U_{опт*}$, при якій втрати будуть мінімальними, а ККД максимальним, визначається з умови

$$\frac{d\Delta P_{\Sigma опт*}}{dU_*} = 0. \quad (2.138)$$

або

$$\frac{d\Delta P_{c*}}{dU_*} = \frac{\beta_m^2 \Delta P_{v*}}{dU_*}. \quad (2.139)$$

З (2.136), взявши похідні за виразами в чисельнику і знаменнику, з урахуванням, що $\Phi_* \cong U_* / \omega_*$, отримаємо

$$\frac{d\Delta P_{c*}}{dU_*} = 2a_2 U_* \sqrt{\omega_*}; \quad (2.140)$$

$$\frac{d\beta_m^2 \Delta P_{v*}}{dU_*} = \beta_m^2 \left(-\frac{2a_4}{U_*^3} - \frac{2a_5 \beta_{оп}^2}{U_*^3} - \frac{2a_6}{U_*^3} \right). \quad (2.141)$$

При спільному вирішенні (2.139), (2.138) і (2.141), отримаємо

$$2a_2 U_* \sqrt{\omega_*} = 2\beta_m^2 \cdot 1 / U_*^3 (a_4 + a_5 \beta_{оп}^2 + a_6)$$

або

$$a_2 U_*^4 \sqrt{\omega_*} = \beta_m^2 (a_4 + a_5 \beta_{оп}^2 + a_6),$$

звідки

$$U_{опт*} = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{оп}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}, \quad (2.142)$$

де $U_{опт*}$ - оптимальне значення напруги, що забезпечує регулювання ДПС при максимальному ККД.

Магнітний потік $\Phi_{онм*}$ і струм збудження $I_{зб.онм*}$ при регулюванні напруги по (2.142) приймаються рівними

$$\Phi_{онм*} \cong U_{онм*} / \omega_*; \quad I_{зб.онм*} \cong U_{опт*} / (K_\mu \cdot \omega_*), \quad (2.143)$$

Характеристика регулювання $U_{онм*}$ (2.142), потоку $\Phi_{онм*}$ і струму $I_{зб.онм*}$ (2.143) спільно з правильно обраними умовами регулювання, забезпечують режим керування тягового ДПС відповідно до заданим коефіцієнтом навантаження β_m і максимальним ККД двигуна.

Розглянемо формування режиму керування ДПС послідовного збудження по максимуму ККД на основних ділянках граничної механічної характеристики $M_*(\omega_*)$ і характеристики регулювання $U_*(I_*)$, представлених на рис. 2.10 і 2.11. В інтервалі кутових швидкостей $0 \leq \omega_* \leq \omega_{min*}$ на ділянці АВ в режимі пуску ДПС приймаються наступні умови пуску: $M_* = M_{п*} = 2...3$; $I_* = I_{п*} = 2...3$; $\beta_{оп} = 1$. Характеристика регулювання по (2.76)

$$U_{min*} = a\Phi_{п*}\omega_{min*} + vI_{п*}; \quad (2.144)$$

$$\Phi_{П*} = \Phi_{П*}(I_{П*}).$$

В рівнянні (2.144) $a = E_H / U_H = 0,95$; $\epsilon = I_H R_a' / U_H = 0,05$. В інтервалі швидкостей $\omega_{min*} \leq \omega_* \leq 1$ на ділянці DC характеристики $M_*(\omega_*)$ і $U_*(I_*)$ умови регулювання: $P_{1*} = 1$; $I_* = I_*(\omega_*)$; $\beta_{оп} = 1$; $\beta_m = const$.

Характеристика регулювання

$$U_{опт*}^2 = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{опт*}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}; \quad (2.145)$$

$$\Phi_{опт*} = U_{опт*} / \omega_*; I_{в.опт*} = U_{опт*} / (K_\mu \cdot \omega_*).$$

В інтервалі швидкостей $1 \leq \omega_* \leq \omega_{1*}$ на ділянці СС' (рис. 2.10), ω_{1*} - гранична швидкість, до якої забезпечується раціональне економічне регулювання і допустимі потенційно-комутаційні умови при $U_* > 1$. При кратності швидкості $K_\omega \geq 3$ значення ω_{1*} приймається рівним $\omega_{1*} = 2$. Умови регулювання $P_{1*} = 1$; $I_* = I_*(\omega_*)$; $\beta_{оп} = 1$; $\beta_m = const$.

Характеристика регулювання

$$U_{опт*}^2 = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{опт*}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}; \quad (2.146)$$

$$\Phi_{опт*} = U_{опт*} / \omega_*; I_{в.опт*} = U_{опт*} / (K_\mu \cdot \omega_*).$$

В інтервалі швидкостей $\omega_{1*} \leq \omega_* \leq \omega_{max*}$ на ділянці С'D характеристики $M_*(\omega_*)$ умови регулювання: $P_{1*} = 1$; $\beta_{оп} \geq 0,4$; $\beta_m = const$, характеристики регулювання

$$\Phi_* = \frac{U_{max}^2 - \epsilon}{a - \omega_{max*} U_{max*}}; \quad (2.147)$$

$$U_* = U_{max*}.$$

Режими керування ДПС послідовного збудження електромоблока по максимуму ККД наведені в таблиці 2.2

Для визначення $U_{опт*}$ і $\Phi_{опт*}$ по (2.145) необхідно встановить зв'язок між коефіцієнтом насичення K_μ і швидкістю ω_* , що досягається побудовою залежностей $U_{опт*}(\omega_*)$ і $\Phi_{опт*}(K_\mu)$ на основі спільного розгляду графічних залежностей $K_\mu(I_{3\phi*})$ і $I_{3\phi*}(\omega_*)$, побудованих на основі характеристик

намагнічування (рис. 2.13) і співвідношень (2.143) для тих же значень коефіцієнта K_μ .

Для часткових тягових механічних характеристик ($P_{1*} < 1$) при реалізації режиму керування по максимуму ККД зміна напруги і коефіцієнта ослаблення поля визначається за рівнянням

$$\begin{aligned} U_{\text{ОПТ.Ч}^*} &= U_{\text{ОПТ}^*} \cdot \sqrt{P_{1*}}; \\ \beta_{\text{ОП.ОПТ.Ч}^*} &= \beta_{\text{ОПТ.Ч}^*} \cdot P_{1*}. \end{aligned} \quad (2.148)$$

Оптимальні характеристики регулювання (2.142) і (2.143) забезпечують керування ДПС по максимуму ККД і заданій величині β_m . Важливою при цьому є наступна обставина. Згідно графіка ККД ДПС, представленого на рис. 2.6, значення максимального ККД η_{\max} не відрізняється критичністю, тобто при порівняно великій зоні зміни коефіцієнта навантаження β ККД двигуна близькі за значенням η_{\max} при $\beta_m = 0,7 \dots 0,9$. Це істотно спрощує практичну реалізацію режимів керування ДПС по максимуму ККД з використанням порівняно простих за будовою вентильних перетворювачів у вигляді керованих тиристорних регуляторів напруги.

Таблиця 2.2

Режими керування ДПС привода електромоблока по максимуму ККД

Інтервали кутових швидкостей	Умови регулювання	Характеристики регулювання	Режими керування
$0 \leq \omega_* \leq \omega_{\min^*}$	$M_{\text{П}^*} = 2 \dots 3$ $I_{\text{П}^*} = 2 \dots 3$ $\beta_{\text{ОП}} = 1$	$U_{\min^*} = 0,95 \Phi_{\text{П}^*} \omega_{\min^*} - 0,05 I_{\text{П}^*}$ $\Phi_{\text{П}^*} = \Phi_*(I_{\text{П}^*})$	1
$\omega_{\min^*} \leq \omega_* \leq 1,$ $1 \leq \omega_* \leq \omega_{1^*}$	$P_{1^*} = 1$ $I_* = I_*(\omega_*)$ $\beta_{\text{ОП}} = 1$ $\beta_m = \text{const}$	$U_{\text{ОПТ}^*}^2 = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{\text{ОПТ}^*}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}$ $\Phi_{\text{ОПТ}^*} = U_{\text{ОПТ}^*} / \omega_*$ $I_{\text{ЗБ.ОПТ}^*} = U_{\text{ОПТ}^*} / (K_\mu \cdot \omega_*)$	2, 3
$\omega_{1^*} \leq \omega_* \leq \omega_{\max^*}$	$P_{1^*} = 1$ $\beta_{\text{ОП}} \geq 4$ $\beta_m = \text{const}$	$\Phi_* = \frac{U_{\max^*}^2 - \epsilon}{a - \omega_{\max^*} U_{\max^*}}$ $U_* = U_{\max^*}$	4

У підсумку відзначимо, що вибір раціональних режимів керування тяговим ДПС електромоблока слід робити на основі трьох критеріїв раціонального керування, що дозволяють забезпечити простими і надійними засобами реалізацію заданої тягової характеристики $M_*(\omega_*)$ з високими техніко-економічними показниками.

2.9 Теоретичні дослідження спостережника швидкості двигуна постійного струму привода мотоблока

Двигун постійного струму привода електромоблока отримує живлення від керованого тиристорного перетворювача. Останній має систему керування з класичним підлеглим принципом регулювання - зовнішній контур регулювання швидкості, внутрішній - контур регулювання струму. Оскільки датчик швидкості в проектованому варіанті відсутній, то в якості зворотного зв'язку за швидкістю будемо використовувати оцінку швидкості, яка обчислюється за допомогою спостережника. Структурно-функційна схема керування електродвигуном привода електромоблока наведена рис. 2.14.

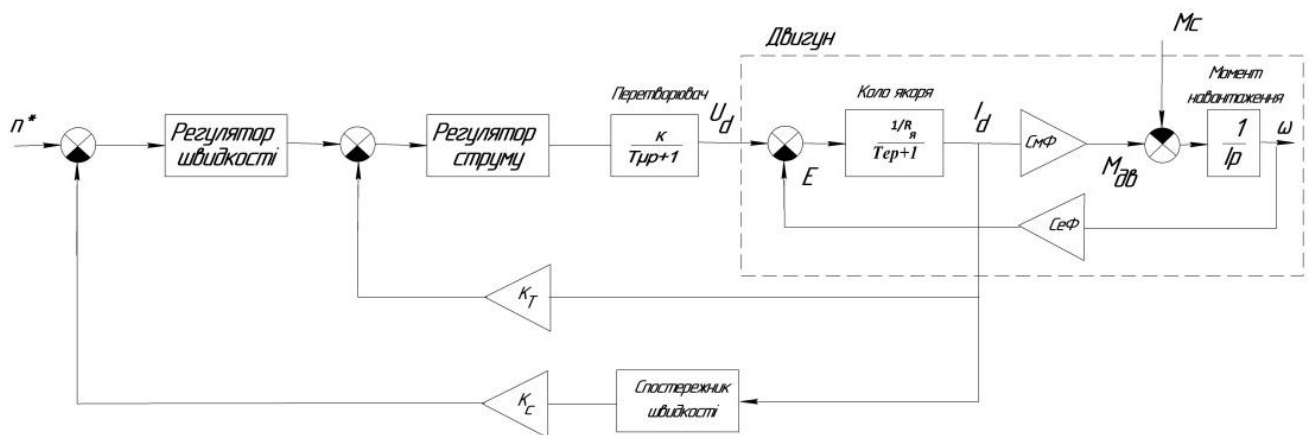


Рисунок 2.14 - Структурно-функційна схема системи керування електродвигуном привода електромоблока

Об'єктом керування системи є двигун постійного струму послідовного збудження, який можна описати наступними рівняннями [126]

$$M = C_M \Phi I_a; \quad (2.149)$$

$$E = C_e \Phi \omega; \quad (2.150)$$

$$I_a = \frac{1}{R_a (T_e p + 1)} (U_a - E); \quad (2.151)$$

$$\omega = \frac{1}{Jp} (M - M_{on.}), \quad (2.152)$$

де M – електромагнітний момент ДПС;

C_M, C_e – конструктивні коефіцієнти ДПС;

Φ – магнітний потік;

I_a – випрямлений струм, (струм якоря ДПС);

ω – кутова швидкість обертання якоря ДПС;

p – оператор диференціювання;

R_a, T_e – активний опір і постійна часу кола якоря ДПС;

U_a – випрямлена напруга ТП, (напруга підведена до якоря ДПС);

J – момент інерції ДПС і механізму, приєднаного до вала ДПС;

$M_{on.}$ – момент опору (навантаження), приведений до вала ДПС.

Тиристорний перетворювач (ТП) можна описати наступним виразом [144]

$$U_a = \frac{k}{T_\mu p + 1} u, \quad (2.153)$$

де k – коефіцієнт підсилення ТП;

T_μ – постійна часу ТП;

u – керуюча дія, вихід регулятора струму.

Внаслідок малості величини T_μ (на 2-3 порядки), відносно очікуваної постійної часу процесу регулювання швидкості, знехтуємо величиною T_μ . Тоді вираз (2.153) отримаємо у наступному вигляді

$$U_a = k u. \quad (2.154)$$

Зробимо обґрунтоване припущення, що момент навантаження, прикладений до вала двигуна є повільнозмінним в масштабі часу

спостережника швидкості, тоді можна записати

$$\dot{M}_c = 0. \quad (2.155)$$

Для синтезу спостережника швидкості представимо вирази (2.149)-(2.152), (2.154) у формі Коши з урахуванням $T_e = \frac{L_a}{R_a}$:

$$\dot{I}_a = \frac{1}{L_a}(-R_a I_a - C_e \Phi \omega + k u), \quad (2.156)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(C_M \Phi I_a - M_c). \quad (2.157)$$

Представимо рівняння (2.155)-(2.157) в матричній формі

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (2.158)$$

$$\dot{y} = Cx, \quad (2.159)$$

де x – вектор стану, $x = \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \\ M_c \end{bmatrix}$

u – вектор вимірювань,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_e} & -\frac{C_e \Phi}{L_a} & 0 \\ \frac{C_M \Phi}{J} & 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{k}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [k_i \quad 0 \quad 0].$$

Перевіримо умову спостережності системи (2.158), (2.159.71). Для того, щоб система була повністю спостережною необхідно і достатньо, щоб при нульових вхідних і вихідних сигналах величина $x=0$. Система (2.158), (2.158) цьому критерію відповідає.

Визначимо для спостережника швидкості згідно [47]

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + Q_y(\hat{y} - y), \quad (2.160)$$

де \hat{x} , \hat{y} – оцінки векторів стану і вимірювання.

Рівняння (2.160) можна перетворити з урахуванням (2.159) і $Q_x = -Q_y C$

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - Q_x(\hat{x} - x), \quad (2.161)$$

$$\text{де } Q_x = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ q_2 & 0 & 0 \\ q_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Характеристичне рівняння (2.161) представимо у вигляді

$$|Ep - A + Q_x| = 0, \quad (2.162)$$

де E – одинична матриця.

Після перетворень (2.162) отримаємо рівняння

$$p^3 + p^2 \left(\frac{1}{T_e} + q_1 \right) + p \frac{C_e \Phi}{L_a} \left(\frac{C_M \Phi}{J} - q_2 \right) + q_3 \frac{C_e \Phi}{L_a J} = 0. \quad (2.163)$$

Використавши модальне керування розподілимо корні поліному по Батерворту

$$p^3 + 2\omega_0 p^2 + 2\omega_0^2 p + \omega_0^3 = 0. \quad (2.164)$$

Для цього порівняємо коефіцієнти при відповідних степенях оператора диференціювання

$$2\omega_0 = \frac{1}{T_e} + q_1. \quad (2.165)$$

$$2\omega_0^2 = \frac{C_e \Phi}{L_a} \left(\frac{C_M \Phi}{J} - q_2 \right). \quad (2.166)$$

$$\omega_0^3 = q_3 \frac{C_e \Phi}{L_a J}. \quad (2.167)$$

З (2.165)-(2.167) визначимо коефіцієнти спостережника

$$q_1 = 2\omega_0 - \frac{1}{T_e}; \quad q_2 = \frac{C_M \Phi}{J} - \frac{2\omega_0^2 L_a}{C_e \Phi}; \quad q_3 = \frac{\omega_0^3 L_a J}{C_e \Phi}. \quad (2.168)$$

Враховуючи, що ступень стійкості $\eta = 0,707\omega_0$, а час перехідного процесу $t = 3\eta^{-1}$, можна визначити ω_0

$$\omega_0 = \frac{4,24}{t}. \quad (2.169)$$

Отримаємо рівняння спостережника в скалярному виді

$$\dot{\hat{I}}_d = -\frac{1}{T_e} \hat{I}_d - \frac{C_e \Phi}{L_a} \hat{\omega} + \frac{k}{L_a} u - q_1 (\hat{I}_d - I_d). \quad (2.170)$$

$$\dot{\hat{\omega}} = \frac{C_M \Phi}{J} \hat{I}_d - \frac{\hat{M}_c}{J} - q_2 (\hat{I}_d - I_d). \quad (2.171)$$

$$\dot{\hat{M}}_c = -q_3 (\hat{I}_d - I_d). \quad (2.172)$$

Таким чином, отримано спостережник (2.170)-(2.172) з коефіцієнтами (2.168) з розподіленням коренів характеристичного рівняння по Батерворту.

Проведемо дослідження отриманого спостережника шляхом моделювання в програмі Matlab/Simulink [23,33,100,104,144,]. Параметри регуляторів швидкості і струму визначимо використовуючи вбудований тюнер в блок PID Controller. В регуляторах були використані обмеження по мінімальному і максимальному значенню виходу. Проводилось моделювання роботи системи, показаної на рис. 2.14.

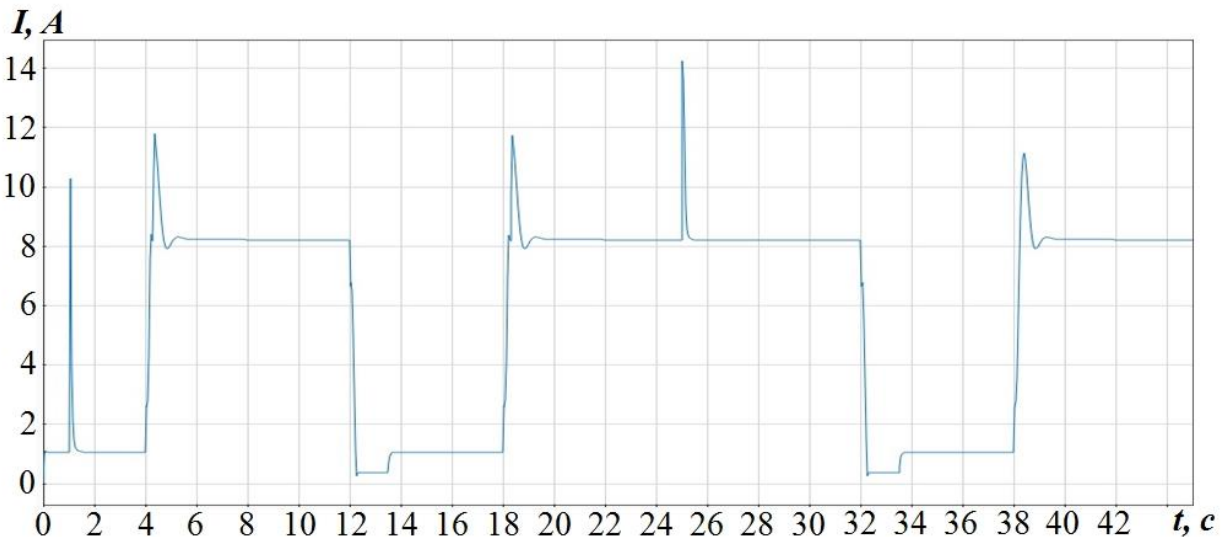
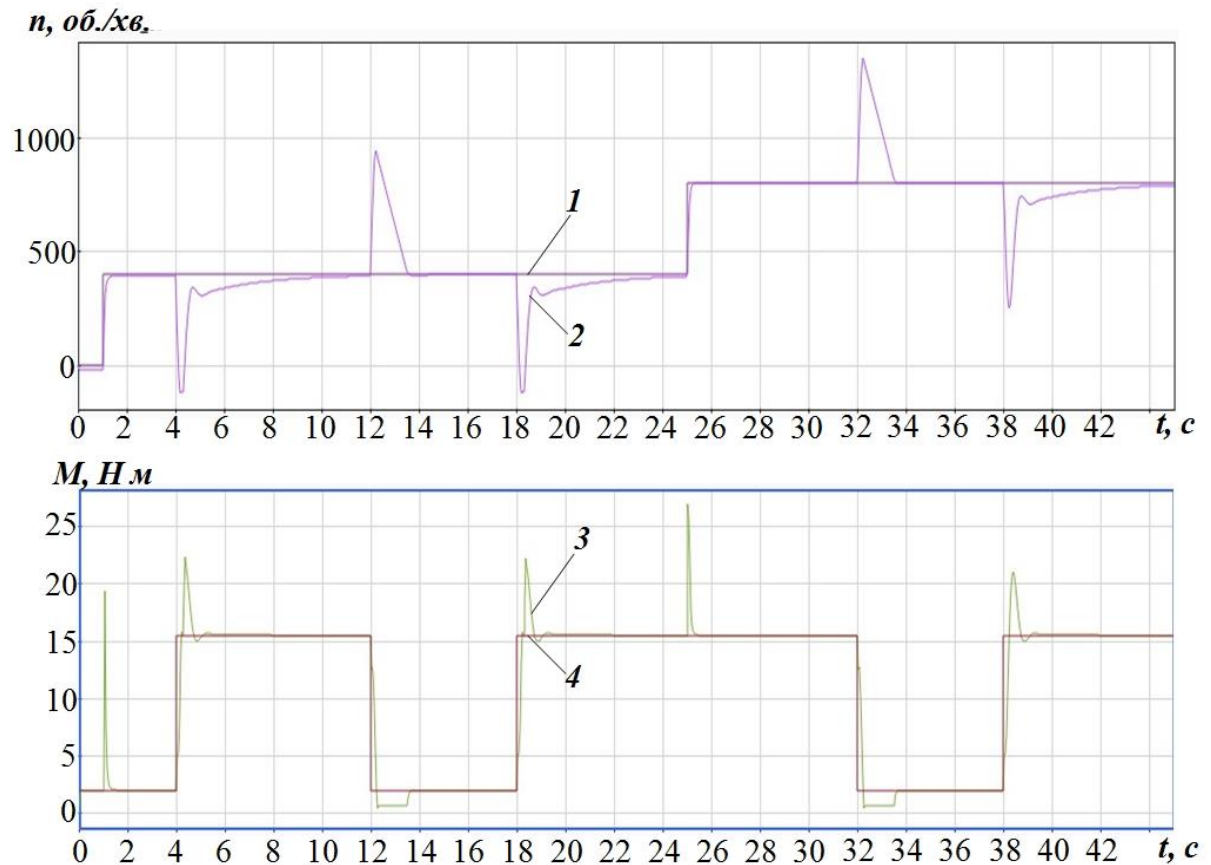


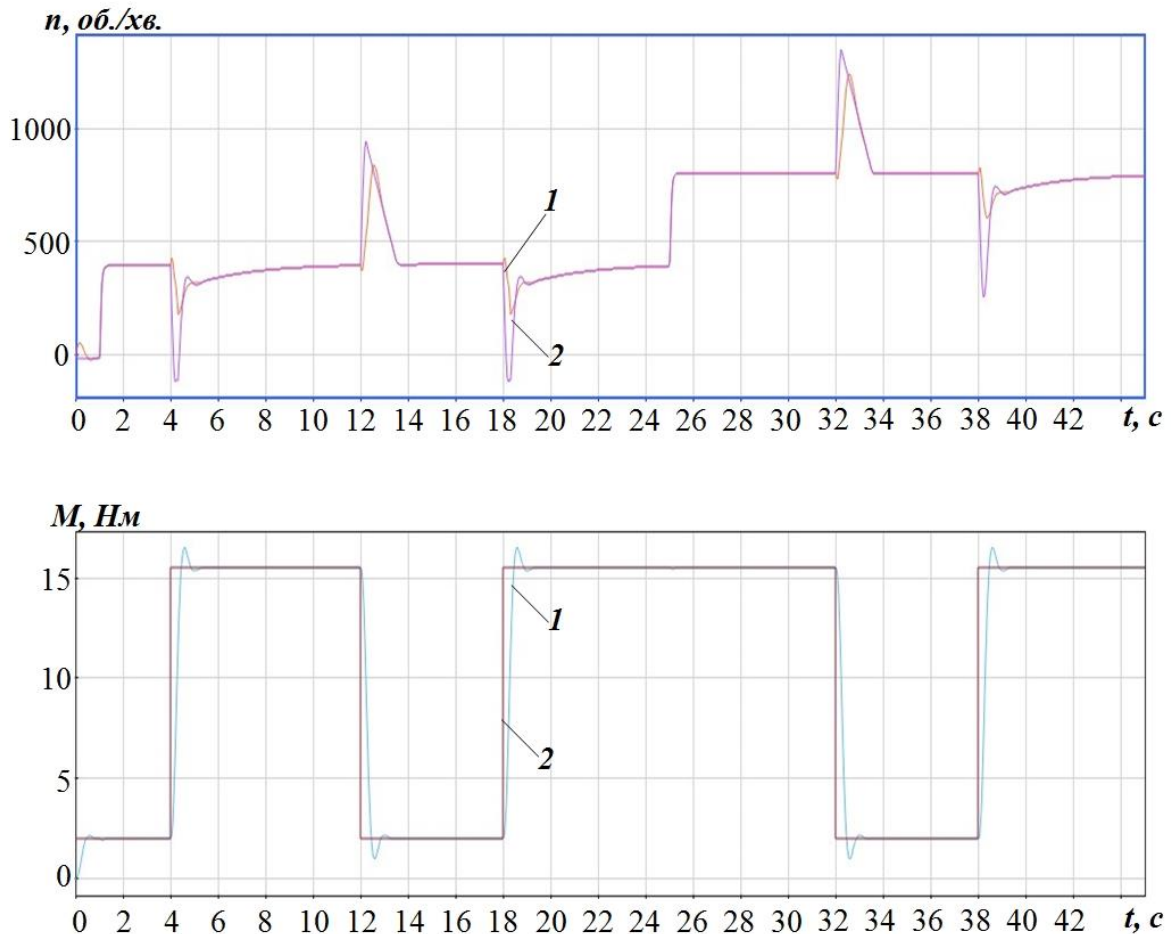
Рисунок 2.15 - Залежність фактичного струму ДПС (I_a) від часу



1 - задана частота обертання, об./хв.; 2 – фактична частота обертання ДПС, об./хв.; 3 – електромагнітний момент, створюваний ДПС, Н·м; 4 – момент опору навантаження, прикладений до валу ДПС, Н·м.

Рисунок 2.16 - Залежності заданої швидкості, фактичної швидкості, електромагнітного моменту, створюваного ДПС та моменту опору навантаження від часу

В момент часу 1 секунда подавалось завдання на швидкість рівну 50% від номінальної (400 об/хв.). Відбувався розгін двигуна і в момент часу 4 секунди до двигуна прикладався номінальний момент навантаження. В період с 12 по 18 секунду проводилась імітація пробуксовування (величина моменту зменшувалась до величини моменту тертя), потім момент навантаження відновлювався. В момент часу 25 секунд завдання на швидкість змінювалось на 100%, при наявності моменту опору. В період с 32 по 38 секунду знову проводилась імітація пробуксовування с подальшим відновленням моменту навантаження.



1 – частота обертання, яка оцінена за допомогою спостережника, об./хв.; 2 – фактична частота обертання ДПС, об./хв.; 3 – момент опору, оцінений за допомогою спостережника, Н·м; 4 – момент опору (навантаження), прикладений до валу ДПС, Н·м.

Рисунок 2.17 - Залежності швидкості, яка оцінена за допомогою спостережника, фактичної швидкості ДПС, моменту опору, оціненого за допомогою спостережника та моменту опору навантаження від часу

Слід звернути увагу, що всі впливи – зміна швидкості і моменту, проводилися стрибком. Це було необхідно для дослідження якості отриманої системи. Зазвичай в реальних умовах ці впливи відбуваються плавно.

Аналізі залежностей, зображених на рисунках (2.15-2.17), дозволяє зробити висновок, що тривалість перехідного процесу не перевищує 1,5 с., перерегулювання оцінки моменту навантаження складає 4,3%, що відповідає заданому розподілу коренів поліному по Батерворту, похибки величин, що

регулюються, асимптотично прагнуть до нуля. Відповідно, розроблена система є асимптотично стійкою. Використання спостережника дозволяє виключити з системи ненадійний елемент - давач швидкості, що позитивно впливає на швидкодію, надійність та точність роботи системи. При цьому зберігаються всі властивості електромеханічної системи обробітку ґрунту на базі малогабаритного електромоблока.

2.10 Висновки за розділом 2

1. Експлуатаційні показники електромоблока, а також його тягова характеристика $F(V)$ і механічна характеристика тягового електродвигуна $M(\omega)$ дозволяють визначити параметри регулювання K_ω , K_M , U_{max*} , I_{max*} , Φ_* , розрахункову $P_{расч}$ і номінальну P_n потужності, які впливають на енергетичні та техніко-економічні показники, а також на вибір конструктивного виконання, номінальних даних і внутрішніх параметрів тягового електродвигуна.

2. Для формування режиму керування двигуна постійного струму привода електромоблока в режимі пуску необхідне значення напруги живлення обмотки якоря становить $0,05U_n$, що дає можливість забезпечити кратність пускового струму і моменту $M_* = M_{II*} = 2...3$; $I_* = I_{II*} = 2...3$ при коефіцієнті ослаблення магнітного потоку $\beta_{оп} = 1$. Для керування ДПС в режимі незмінності споживаної потужності необхідне значення напруги живлення обмотки якоря становить $U_{омт.} = 0,75...0,9U_n$, що дасть можливість забезпечити керування по максимуму ККД ($\beta_m = const$) при коефіцієнті ослаблення магнітного потоку $\beta_{оп} = 1$. Для керування ДПС в режимі максимальної швидкості необхідне значення напруги живлення обмотки якоря становить U_n , при коефіцієнті ослаблення магнітного потоку $\beta_{оп} \geq 0,4$.

3. Проведено оцінку потенційно-комутаційних умов на колекторі тягового ДПС, яка показала, що небезпечного іскріння під щітками на колекторі ДПС не виникає, якщо питома потужність дугового

розряду $P_{\text{ннт.}} = 1 \text{ Вт} / \text{см}$. Таким чином, обмеження по комутаційно-потенційним умовам ТЕД постійного струму, визначаються наступними співвідношеннями: $U_{\text{кmax}} \leq 30 \dots 35 \text{ В}$ в ДПС середньої потужності; $U_{\text{кmax}} \leq 40 \dots 45 \text{ В}$ в ДПС малої потужності; $V_{\text{а.доп.}} = 65 \dots 75 \text{ м} / \text{с}$; $V_{\text{к.доп.}} = 50 \dots 55 \text{ м} / \text{с}$.

4. При дослідженні спостережника швидкості обертання ДПС привода електромоблока встановлено, що тривалість перехідного процесу не перевищує 1,5 с., перерегулювання оцінки моменту навантаження складає 4,3%, що відповідає заданому розподілу коренів поліному по Батерворту, похибки величин, що регулюються, асимптотично прагнуть до нуля. Відповідно, розроблена система є асимптотично стійкою.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма лабораторних та польових досліджень

Для підтвердження та доповнення теоретичних досліджень електропривода ґрунтообробного електромоблока наведених в розділі 2, на кафедрі електротехніки і електромеханіки імені професора В.В. Овчарова Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного було проведено лабораторні дослідження електромоблока.

Відповідно до поставлених завдань та аналізу теоретичних досліджень розроблено програму лабораторних та польових досліджень електромоблока.

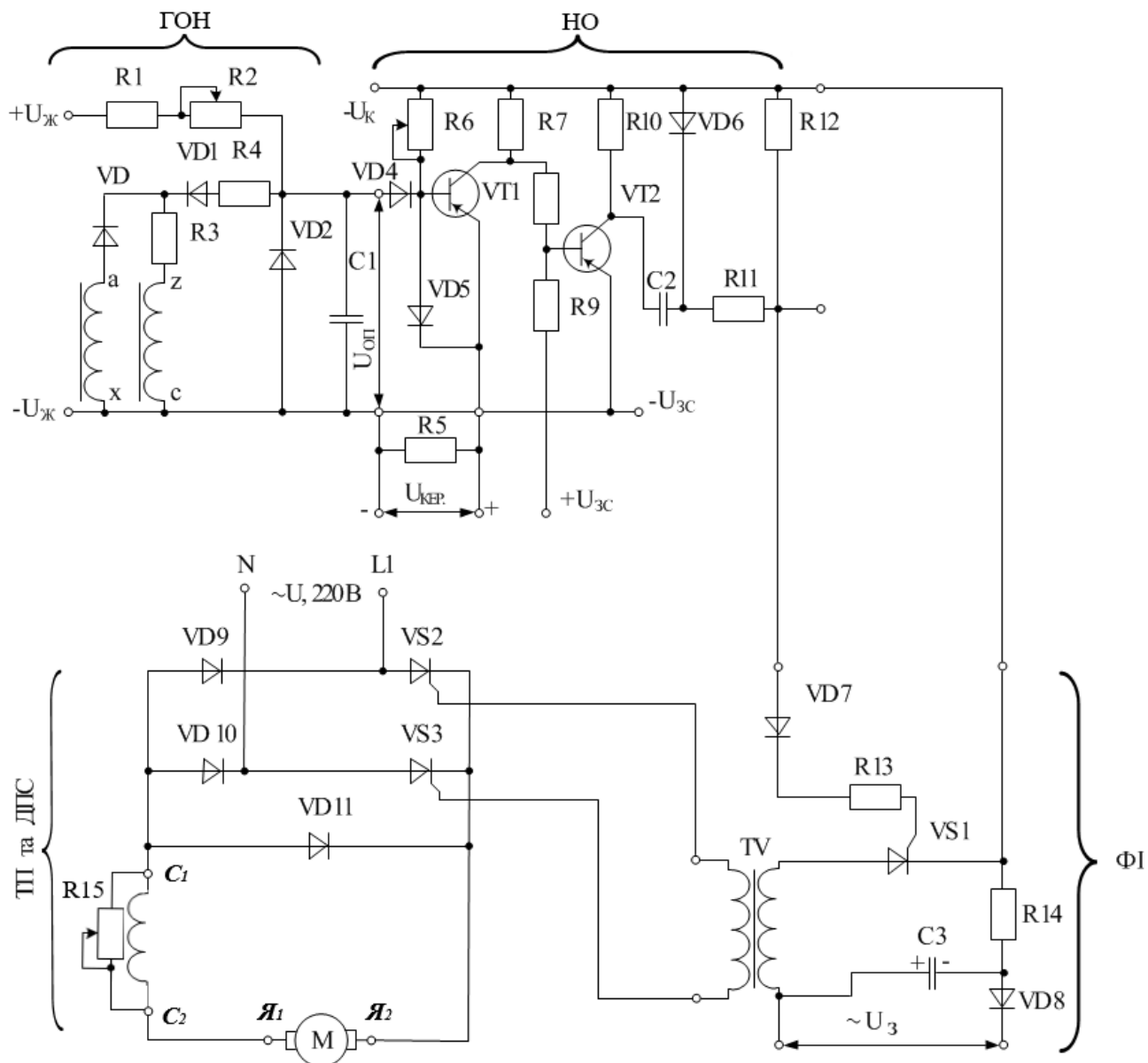
1. Обґрунтувати методику лабораторних досліджень системи імпульсно-фазового керування електродвигуном постійного струму привода електромоблока при використанні напів- та повністю керованого перетворювачів.

2. Провести визначення області раціональних значень основних конструктивних параметрів ґрунтообробного електромоблока методом багатofакторного експерименту.

3. Провести польові дослідження електромоблока з метою визначення потужності та питомої енергоємності обробітку ґрунту на різних швидкостях роботи електромоблока.

3.2 Методика лабораторних дослідження системи керування електродвигуном привода електромоблока

Принципова електрична схема керування приводним ДПС моблока з тиристорним перетворювачем представлена на рис. 3.1. Система працює за принципом вертикального керування з пилкоподібною опорною напругою.



ГОН - генератор опорного напруги; НО - нуль орган; ФІ - формувач і розподільник імпульсів; ТП - тиристорний перетворювач; ДПС - двигун постійного струму послідовного збудження.

Рисунок 3.1 – Принципова електрична схема керування електродвигуном приводу електромоблока

Як генератор опорної напруги (ГОН) використовується генератор з зарядом ємності від джерела постійної напруги U_{Π} і діодним комутатором з

розширеним діапазоном. Напряга керування U_K знімається з виходів емітерного повторювача (ЕП). Опорна напруга u_{OP} і напруга керування U_K подаються на вхід нуля-органу (НО), виконаного на транзисторах $VT1$ і $VT2$. При $u_{OP} < U_K$ транзистор $VT1$ відкритий внаслідок протікання струму через перехід емітер-база по колу: $+U_K$, емітер-база, $R6$, $-U_K$. При відкритому транзисторі $VT1$ транзистор $VT2$ закритий за рахунок сигналу зміщення, що подається на його базу через резистор $R9$ [48].

Вхідна напруга $U_{BX.EП}$ являє собою алгебраїчну суму напруги зсуву U'_{3C} і зовнішньої напруги керування U'_K , тобто $U_{BX.EП} = U'_{3C} \pm U'_K$. Напруга U'_{3C} визначається умовою отримання необхідної початкової фази. Так при $U'_K = 0$ кут регулювання α буде дорівнювати 90° . Регулювання напруги U'_{3C} дає можливість плавно змінювати початкове фазування. Крім того, в системі імпульсно-фазового керування передбачена можливість зміни початкової фази вихідних імпульсів ступенями через 30° шляхом фазування напруги трансформатора, який живить діодний комутатор.

Напруга керування $U'_K = 0$ на вході емітерного повторювача відповідає напрузі $U_{E.Π0}$. При подачі на його вхід напруги керування $U'_{K.Π}$ з полярністю, що відповідає з U'_{CM} , напруга $U_{E.Π}$ зростає. У схемі емітерного повторювача передбачено обмеження максимального значення $U_{E.Π}$ на рівні $U_{EΠ max}$ [48].

При подачі на вхід емітерного повторювача напруги керування $U'_{K.B}$ зворотної полярності, напруга $U_{E.Π}$ буде зменшуватись. При цьому передбачено також обмеження мінімальної напруги на рівні $U_{EΠ min}$. Керуючий імпульс формується в момент рівності напруг u_{OP} і $U_{E.Π}$. При зазначеному фазуванні, якщо напруга U'_V на вході емітерного повторювача дорівнює нулю, вихідна напруга його $U_{E.Π} = U_{E.Π0}$ і керуючий імпульс буде формуватися в момент часу, що відповідає куту $\alpha_0 = 90^\circ$.

В емітерному повторювачі передбачена можливість зміни рівнів $U_{EP\ max}$ і $U_{EP\ min}$, що дозволяє змінювати максимальний кут в інверторному режимі α_{max} і мінімальний кут α_{min} в випрямному режимі. Напруга на виході ЕП обмежується так, що кут α може змінюватися в межах $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$.

Імпульс напруги, що формується нуль-органом, знімається з резистора $R12$ і подається на керуючий електрод допоміжного тиристора $VS1$ тиристорного формувача імпульсів ΦI (генератора імпульсів). Вихідний імпульс знімається з вторинної обмотки імпульсного трансформатора TV і надходить на силові тиристори.

При проведенні лабораторних досліджень системи керування електродвигуном приводу електромоблока в якості механічного навантаження було використано генератор постійного струму незалежного збудження марки П-41 потужністю 2,2 кВт, в коло обмотки якоря якого включено рідинний реостат. При збільшенні електричного навантаження в кола обмотки якоря навантажувального генератора відбувається збільшення механічного навантаження на валу досліджуваного двигуна постійного струму послідовного збудження.

3.3 Методика визначення раціональних параметрів електромоблока

Основними експлуатаційними показниками електромоблока 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 нагріву. Експлуатаційні показники зазвичай визначаються на початковому етапі розробки моблока 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 мотоблоків з тяговими електродвигунами досить обмежений, виникає необхідність теоретичного обґрунтування оптимальних значень експлуатаційних показників електромоблока.

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

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

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 електромоблока на основі планів другого порядку - ортогонального центрального композиційного плану (ОЦКП), методика проведення якого детально описана в [65,66,83,93,95,121]. При цьому в якості функції мети або параметра оптимізації приймається сила тяги мотоблока F і в якості незалежних змінних: корисна потужність приводного електродвигуна P , швидкість руху V і повна маса мотоблока G . Позначення факторів і рівні їх варіювання наведені в таблиці 3.1.

Кодування або нормалізація факторів проводиться за співвідношенням

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

Матриця планування ОЦКП для трьох факторів ($n = 3$) представлена в таблиці 3.2 (стовпці 2, 3 і 4).

Загальна кількість точок плану в факторному просторі становить

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

де N_ϕ – число дослідів повного факторного експерименту;

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

N_0 – число дослідів в центрі плану.

Таблиця 3.1

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, ΔX_i	1,2	0,4	0,9

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

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

де i – номер фактору (1, 2, ..., n);

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

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

Для ортогонального центрального композиційного плану коефіцієнти рівняння регресії визначаються за формулою

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

де k – номер останнього стовпця в матриці ОЦКП;

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

Таблиця 3.2

Матриця ОЦКП для трьох факторів

№ стовбців	1	2	3	4	5	6	7	8	9a	10a	11a	9	10	11	12	13	
Групи точок	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	x_1^2	x_2^2	x_3^2	\tilde{x}_1^2	\tilde{x}_2^2	\tilde{x}_3^2	y	\tilde{y}	
N_Φ	1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	1,85	1,86	
	2	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,2699	+0,2699	+0,2699	6,35	6,28	
	3	+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	+0,2699	+0,2699	+0,2699	2,6	2,6	
	5	+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
N_a	7	+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	+0,2699	+0,2699	+0,2699	4,04	4,03	
	9	+1	-1,215	0	0	0	0	0	+1,476	0	0	0	+0,7459	-0,7301	-0,7301	2,13	2,1
	10	+1	+1,215	0	0	0	0	0	+1,476	0	0	0	+0,7459	-0,7301	-0,7301	4,85	4,9
	11	+1	0	-1,215	0	0	0	0	0	+1,476	0	0	-0,7301	+0,7459	-0,7301	4,22	4,26
	12	+1	0	+1,215	0	0	0	0	0	+1,476	0	0	-0,7301	+0,7459	-0,7301	2,36	2,29
N_θ	13	+1	0	0	-1,215	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	+1,476	-0,7301	-0,7301	+0,7459	4,3	4,19	
	15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,7301	-0,7301	-0,7301	3,13	3,1	

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

$$\hat{y}_g = \tilde{b}_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}}^n b_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (3.5)$$

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

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

При цьому

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

Особливість застосування в даній роботі методу 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 3.1) відповідно до значень факторів матриці планування за наступними рівняннями

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

де η_{Σ} – сумарний ККД електроприводу мотоблока;

ψ – сумарний коефіцієнт опору руху коліс.

При цьому для даного класу мотоблоків, значення η_{Σ} і ψ 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

$$S_B^2\{y\} = (3\sigma)^2 = (3 \cdot 0,02)^2, \quad (3.9)$$

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

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

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

Оцінка значущості коефіцієнтів рівнянь регресії визначається за t-критерієм Стьюдента за умовою

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

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 (3.9), і дорівнює $S_B\{y\} = 0,06$.

Не вагомими виявилися коефіцієнти b_{13}, b_{23}, b_{123} і тому рівняння регресії (3.6) з урахуванням перерахунку вільного коефіцієнта \tilde{b}_0 за рівнянням (3.7) в кінцевому варіанті прийме вид

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

За рівняння (3.11) визначаємо розрахункові значення функції мети \hat{y} для кожного рядка матриці плану (таблиця 3.2) з урахуванням стовпців 2, 3, 4, 5, 9а, 10а і 11а. Розрахункові дані наведені в стовпці 13.

Адекватність отриманого рівняння регресії (3.11) перевіряємо за F-критерієм Фішера з умови

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

де F_p, F_T – розрахункове і табличне значення критерію Фішера;

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

При цьому

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

де d – число значущих коефіцієнтів рівняння (5.11), 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 3.2.

За результатами розрахунків $S_{ad}^2 = 0,0093$ з урахуванням (3.9) $S_B^2\{y\} = 0,0036$ і табличного значення $F_T = 2,64$ умову (3.12) можна записати у вигляді

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

і рівняння регресії (5.11) є адекватним.

3.4 Методика проведення польових досліджень електромотоблока

3.4.1 Методика визначення твердості ґрунту

Твердість ґрунту характеризує його здатність опиратись проникненню в нього будь-якого деформуючого елемента та впливає на основні якісні показники [17]. При проведенні досліджень визначення твердості ґрунту проводилось за стандартною методикою [28,34,82] 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) [17]. 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 згідно методики [34].

3.4.2 Методика визначення вологості ґрунту

Вологість ґрунту, що обробляється суттєво впливає на технологічний процес. Величину вологості ґрунту було визначено за загальноприйнятими методиками [46,49,106], 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 [124,125].

З метою визначення вологості ґрунту використовувалось сертифіковане обладнання: алюмінієві бюкси, бур, термошафа МО-112, електронні ваги ВТЕ-15-Т3-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 витримувались в сушильній шафі 5 годин при температурі 110°C. Перед сушінням вони зважувались на електронних вагах. Після сушіння ґрунтові проби знов зважувались та на основі отриманих результатів виконувався розрахунок вологості за формулою

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

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.

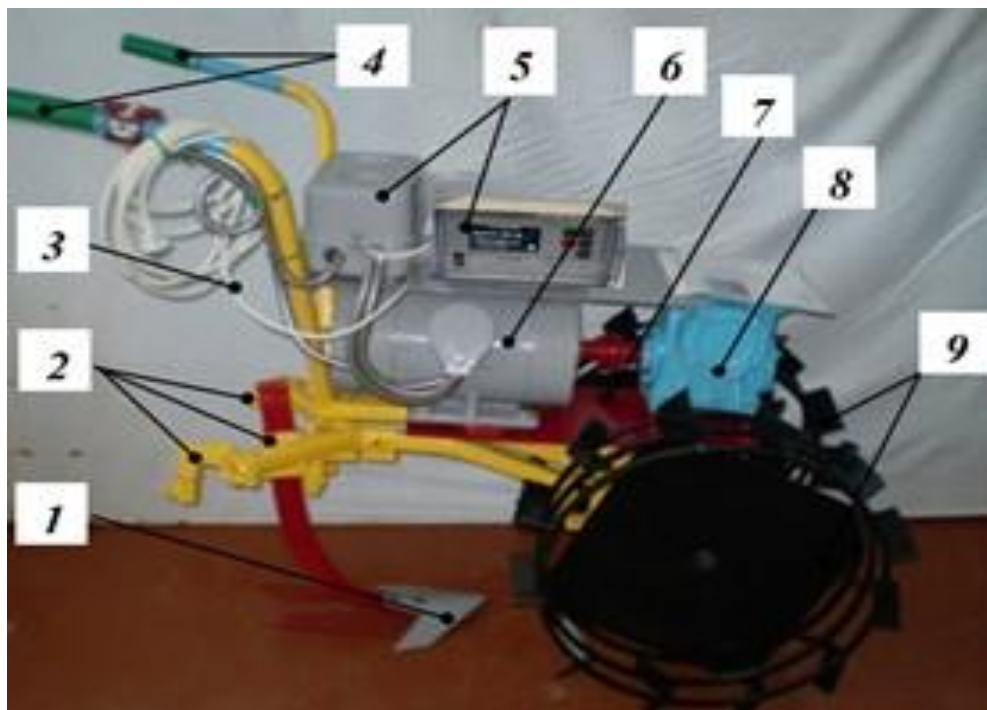
3.4.3 Методика енергетичної оцінки роботи електромоблока

Дослідний зразок електромоблока (рис. 3.3) з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження був виготовлений в лабораторії кафедри електротехніки і електромеханіки імені професора В.В. Овчарова Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного і передбачає централізоване електроживлення від однофазної мережі змінного струму через гнучкий кабель і керований вентиляційний перетворювач.

Таблиця 3.3

Технічна характеристика електромоблока

Тяговий електродвигун	Д-12
Потужність, кВт	2,5
Номінальна напруга живлення, В.	220
Номінальний струм, А	15
Частота обертання, об./хв.	1175
Механічна передача	Черв'ячний редуктор і ланцюгова передача
Продуктивність при оранці ґрунту, га/год.	0,25
Ширина захвату, см.	18...50
Глибина оранки, см.	до 20
Робоча швидкість, км/год.	1,0...7,0
Кількість передач: вперед / назад	5/2
Габаритні розміри, мм:	
довжина	1250
ширина	550
висота	940
Маса, кг	100



1 – робочий орган; 2 – обойми для кріплення робочих органів; 3 – гнучкий кабель; 4 – важелі (рукоятки) керування; 5 – система керування і захисту; 6 – тяговий електродвигун; 7 – корпус (рама); 8 – редуктор; 9 – ходові колеса.

Рисунок 3.3 – Загальний вигляд дослідного зразка електромобіля

Енергетичними показниками обробітку ґрунту електромобілем 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 електромобіля при оранці ґрунту є питома енергоємність обробітку на одиницю об'єму ґрунту, що обробляється [34,87]. Цей показник найбільш повно враховує особливості обробітку ґрунту тяговими робочими органами при оранці. Дослідження енергетичних показників функціонування електромобіля проводились у відповідності до [132] і полягали у визначенні потужності, необхідної для оранки та питомої енергоємності (E_{num} , кВтгод./м³) оранки ґрунту. Результати експериментальних досліджень заносились до журналу випробувань та підлягали обробці у відповідності до стандартної методики.

Під час проведення експериментальних випробувань відбувався контроль наступних величин: напруга та струм в обмотці якоря тягового електродвигуна постійного струму, частота обертання та потужність ТЕД, електрична енергія, споживана з мережі. Для проведення дослідження було використано наступні електровимірювальні прилади: вольтметр VLM 2/300V; амперметр SD-303B; комплект вимірювальний К-505; тахометр цифровий безконтактний BENETECH GM8905; однофазний лічильник НІК 2102-02.

3.5 Висновки за розділом 3

1. Отримана математична модель для дослідження області оптимуму параметра оптимізації електромобіля. При цьому в якості функції цілі прийнята сила тяги мобіля F і в якості незалежних змінних: корисна потужність приводного електродвигуна P , швидкість руху V і повна маса мобіля G .

2. Оцінка значущості коефіцієнтів рівнянь регресії була проведена за t-критерієм Стюдента за умовою $t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_B\{y\}} > t_T = 2,131$, визначена похибка розрахунків y_i , дорівнює $S_B\{y\} = 0,06$, що знаходиться в допустимих межах

3. Адекватність моделі перевірена за F-критерієм Фішера з умови $F_p = 2,58 < F_T = 2,64$, результати перевірки свідчать про те, що отримана модель є адекватною.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Аналіз результатів лабораторних дослідження системи керування електродвигуном привода електромоблока

Досліджено систему імпульсно-фазового керування, де при напівкеруваному перетворювачі (рис. 4.1) струм якоря безперервний практично у всій області регулювання, за винятком зони низьких моментів. При повністю керуваному перетворювачі (рис. 4.2) зони переривчастих струмів займають великі області регулювання. Механічні характеристики мають форму подібну гіперболі. Двигун розвиває великий момент при низьких швидкостях і малий - при високих, що є типовим для двигуна постійного струму послідовного збудження. Однак, механічні характеристики не збігаються з гіперболами у всьому діапазоні регулювання швидкості. Для підтримання сталості потужності $P_1 = const$ з високою точністю, необхідно застосовувати спеціальні системи регулювання при використанні однофазних ТП, що дозволяє зробити висновок про доцільність використання напівкеруваного перетворювача.

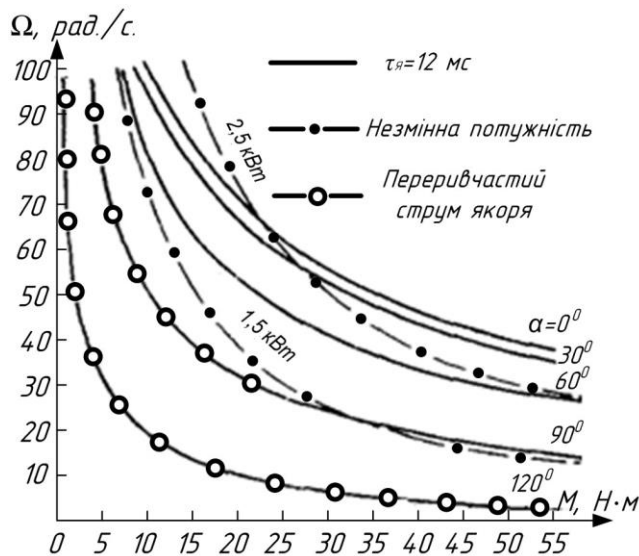


Рисунок 4.1 - Механічні характеристики двигуна послідовного збудження (2,5 кВт, 220 В, 1100 об./хв.) з однофазним напівкеруваним перетворювачем

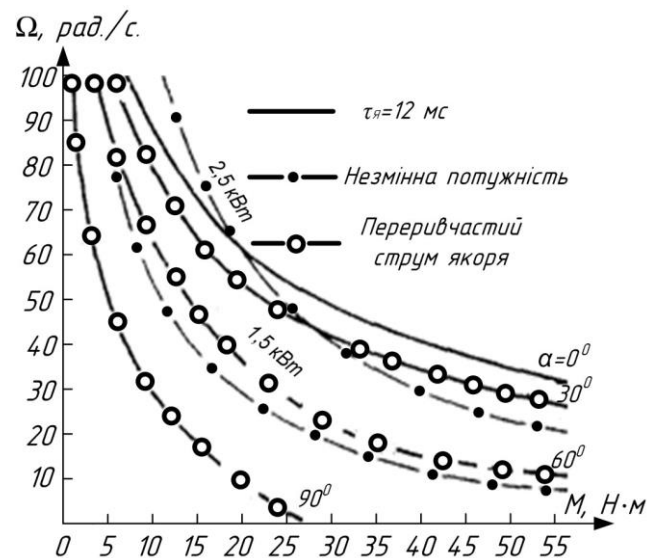


Рисунок 4.2 - Механічні характеристики двигуна послідовного збудження (2,5 кВт, 220 В, 1100 об./хв.) з однофазним повністю керуваним перетворювачем

Розроблена система імпульсно-фазового керування електродвигуном привода електромобіля забезпечує діапазон регулювання кута α до 210° , асиметрію не більше $1,5^\circ$, тривалість імпульсу не менше 450 мкс , амплітуду імпульсів 20 В , а тривалість переднього фронту імпульсу не більше 15 мкс . Коефіцієнт передачі системи імпульсно-фазового керування становить $9^\circ / \text{В}$, тобто при зміні напруги керування на 1 В кут α змінюється на 9° , що забезпечує виконання умов і характеристик регулювання тягового електродвигуна по максимуму ККД [48,22,44].

4.2 Аналіз результатів визначення раціональних параметрів електромобіля

Рівняння регресії (3.11) з урахуванням даних таблиці 3.2 та співвідношеннями між факторами в фізичних і кодованих одиницях

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

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

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

Отримано адекватне рівняння параметра оптимізації електромобіля 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 (3.11) прийме вид

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

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 [65]. Для визначення координат нового центру поверхні відгуку S_z для рівняння (3.11) необхідно виконати диференціювання по кожній змінній x_i і окремі похідні прирівняти до нуля

$$\begin{aligned}\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} &= 1,4 - 0,75x_2 + 0,52x_1 = 0, \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} &= -1,03 - 0,75x_1 + 0,24x_2 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} &= 0,72 + 0,44x_3 = 0.\end{aligned}\tag{4.4}$$

Вирішуючи систему рівнянь (4.4), отримаємо значення координат центру поверхні відгуку S_z

$$x_{1S} = -0,997; \quad x_{2S} = 2,558; \quad x_{3S} = -1,636.\tag{4.5}$$

При підстановці значень координат у вихідне рівняння (5.11) визначаємо величину параметра оптимізації: $Y_S = 1,432$.

Координатам $x_{1S}; x_{2S}$ і x_{3S} , а також величині Y_S відповідають наступні значення чинників і функцій мети в фізичних одиницях згідно (4.1)

$$\begin{aligned}P &= x_{1S} \cdot 1,2 + 1,8 = 0,6 \text{ кВт}; \\ V &= x_{2S} \cdot 0,4 + 0,8 = 1,82 \text{ м / с}; \\ G &= x_{3S} \cdot 0,9 + 1,2 = 0,27 \text{ кН}; \\ F &= 1,432 \text{ кН}.\end{aligned}\tag{4.6}$$

Для отримання аналітичної та графічної інтерпретації області оптимуму параметра оптимізації, описаного рівнянням (3.11), а також визначення експлуатаційних показників електромоблока близьких до оптимальних, скористаємося методом двовимірних перерізів поверхні відгуку. Побудова двовимірних перерізів поверхні відгуку параметра оптимізації виконується в

наступній послідовності [66]. В рівняння регресії (3.11), незалежно від кількості факторів, вводимо значення всіх факторів, близьких до оптимальних значень, або рівних нульовому рівню, крім двох. В результаті рівняння (5.11) 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 в 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 (3.11) три варіанти двовимірних перерізів поверхні відгуку з побудовою та аналізом сімейства контурних кривих.

1. Приймаємо в (3.11) $x_1 = 0$, 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 (3.11) прийме вид

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} &= -1,03 + 0,24x_2 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} &= 0,72 + 0,44x_3 = 0; \\ x_{2s} &= 4,292; \quad x_{3s} = -1,636. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Після підстановки значень x_{2S} і x_{3S} в (4.7) визначимо величину параметру: оптимізації $Y_S = 0,301$. Проводимо канонічне перетворення рівняння (4.4), характеристичний детермінант якого має вигляд

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

Рішення рівняння (4.11) записуємо у вигляді

$$B^2 - a_1 B + a_2 = 0,$$

де $a_1 = (b_{11} + b_{22}) = 0,12 + 0,22 = 0,34$; $a_2 = (b_{11} \cdot b_{22} - 0,25b_{12}^2) = (0,12 \cdot 0,22 - 0,23 \cdot 0^2) = 0,0264$,

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

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

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 4.3

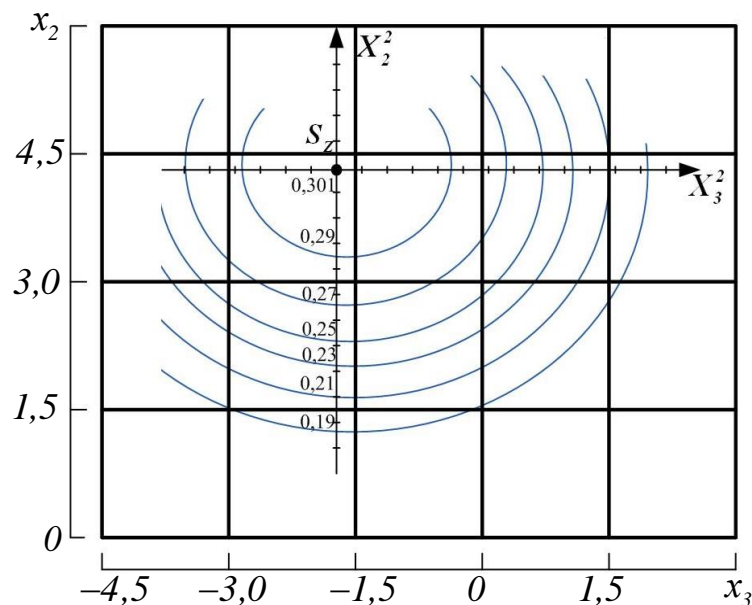


Рисунок 4.3 - Контурні криві перетинів поверхні відгуку при ($x_1 = 0, P = 1,8 \text{ кВт}$) і значеннях $Y_S = 0,301; 0,29; 0,27; 0,25; 0,23; 0,21; 0,19$.

Дані рис. 4.3 свідчать, що максимальне значення параметра оптимізації в перерізі дорівнює $0,301 \text{ кН}$ і має місце при швидкості руху $x_{2s} = 1,636$, або відповідно до (4.1), в фізичних одиницях $V = 2,52 \text{ м/с}$ і $G = 0,27 \text{ кН}$. Згідно області оптимуму при $Y_s = 0,29$ і $P = 1,8 \text{ кВт}$, значення розглянутих факторів близькі до оптимальних знаходяться в межах $V = 2,2 \dots 3,0 \text{ м/с}$ і $G = 1,3 \dots 0,83 \text{ кН}$.

2. Приймаємо в (3.11) $x_2 = 0$, що відповідає значенню фактору $V = 0,8 \text{ м/с}$. Двовимірний перетин поверхні відгуку в цьому випадку буде характеризувати параметр оптимізації в залежності від потужності (x_1) і маси (x_3) електромоблока. Рівняння (3.11) прийме вид

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

Визначимо координати центру поверхні і величину параметру оптимізації

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

В результаті рішення системи отримуємо $x_{1s} = 2,692$; $x_{3s} = 1,636$ і $Y_s = 0,626$. Рішення характеристичного детермінанта (4.9) 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

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

В цьому випадку контурні криві також будуть мати форму еліпса (рис. 4.4). Згідно рис. 4.4, в 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 $Y_s = 0,6 \text{ кН}$ випливає, 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 $V = 0,8 \text{ м/с}$.

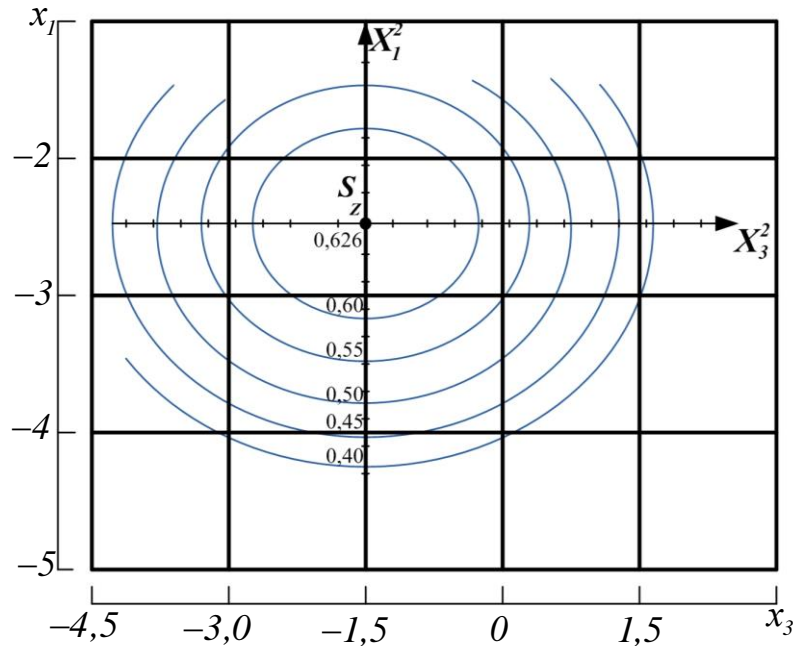


Рисунок 4.4 – Контурні криві перетинів поверхні відгуку при $x_2 = 0$ ($V = 0,8 \text{ м/с}$) і значеннях $Y_s = 0,626$ (центр); 0,6; 0,55; 0,5; 0,45; 0,4.

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

$$\text{ctg} 2\alpha = \frac{b_{ii} - b_{jj}}{b_{ij}}. \quad (4.14)$$

У нашому випадку

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

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

Остаточне вихідне рівняння (4.11) набуде вигляду

$$\hat{y} = 3,1 + 1,4x_1 - 1,03x_2 + 0,26x_1^2 + 0,12x_3^2. \quad (4.15)$$

Визначимо координати центру поверхні відгуку диференціюванням рівняння (4.14) і рішенням системи

$$\begin{aligned}\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} &= 1,4 + 0,52x_1 = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} &= -1,03 + 0,24x_2 = 0.\end{aligned}\tag{4.16}$$

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 (4.14) 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 (4.14) в 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. 4.5.

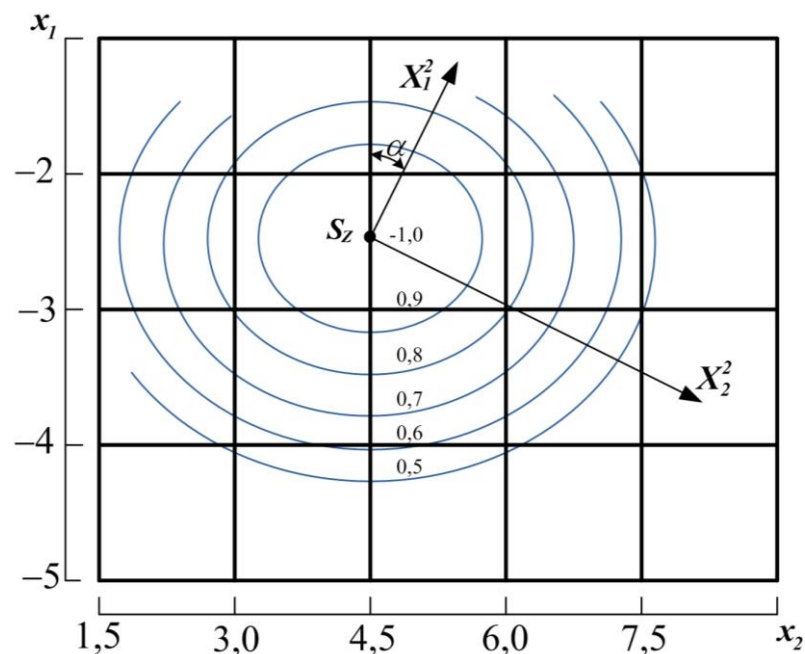


Рисунок 4.5 – Контурні криві двовимірних перерізів поверхні відгуку при $x_3 = 0$ ($G = 1,2 \text{ кН}$) і значеннях $Y_s = 0,9; 0,8; 0,7; 0,6$ і $0,5$.

З рис. 4.5 випливає, що в перерізі поверхні відгуку максимальне значення параметра оптимізації $Y_s = -1,0 \text{ кН}$ має місце при значеннях факторів $x_{1s} = -2,69$ і $x_{2s} = 4,29$ або в фізичних одиницях відповідно до (5.15) потужність $P = 1,43 \text{ кВт}$ і швидкість $V = 2,2...3,0 \text{ м/с}$ при $G = 1,2 \text{ кН}$.

За отриманими кривими двомірних перерізів поверхонь відгуку (рис. 4.3-4.5) можна судити про зміну величини критерію оптимізації F в залежності від кодованих 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 електромоблоків 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 електромоблока

Польові випробування дослідного зразку мотоблока МБ-КЕП оснащеного тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження проводилась на контрольних ділянках ФГ «ЄНІСЕЙ-7» (с. Ботієве Мелітопольського району Запорізької області) 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.

Загальний вигляд дослідного зразку електромоблока при агрегуванні з плугом П1-20/2 при проведенні польових випробувань представлено на рис. 4.6.



Рисунок 4.6 - Польові випробування електромоблока

При проведенні польових випробувань контролювалися значення напруги, струму якоря 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 по експлуатації мотоблока [118] 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. 4.7. 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.

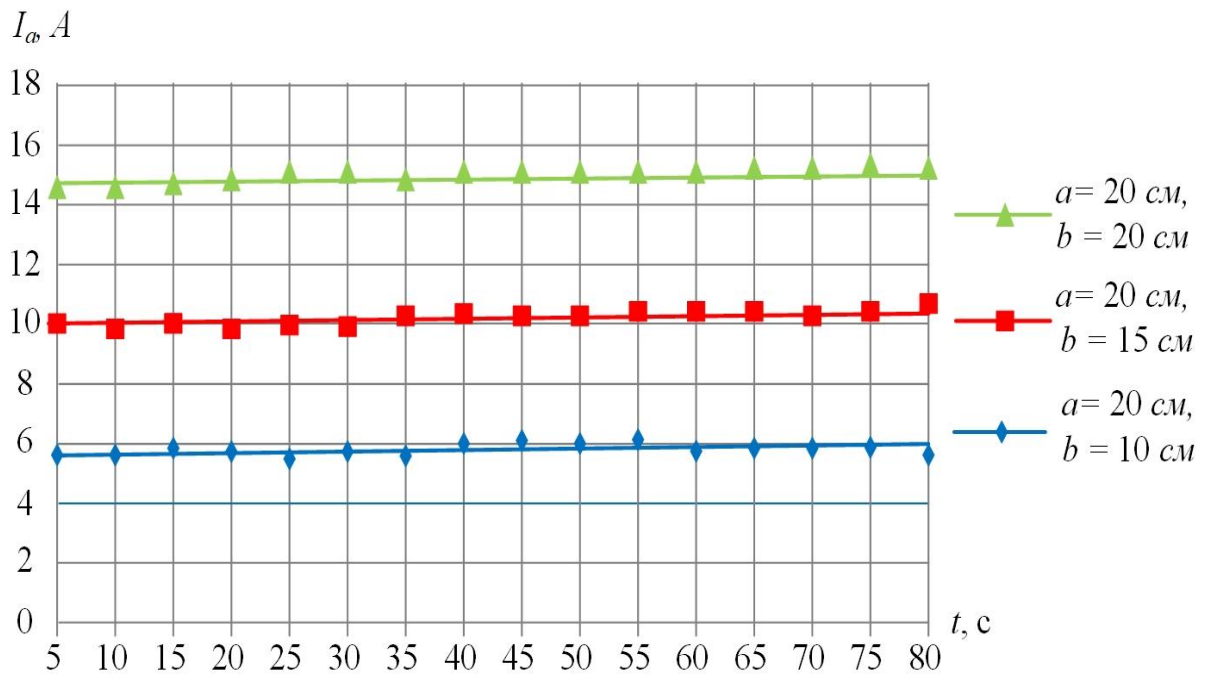


Рисунок 4.7 - Струмо-часова характеристика електродвигуна приводу
грунтообробного електромоблока

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

$$E_{num} = \frac{P}{Q_v}, \quad (4.17)$$

де E_{num} – питома енергоємність, кВт·год./м³;

Q_v – об’ємна продуктивність мотоблока, м³/год.

Значення об’ємної продуктивності мотоблоку визначаємо за рівнянням

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

де b – ширина захвату агрегату, м;

v_n – лінійна швидкість переміщення мотоблоку, км./год.;

h – глибина обробки ґрунту, м.

Таблиця 4.1

Результати польових випробувань електромоблока

Найменування показника, розмірність	Склад агрегату									
	Моблок «МБ-КЕП» + плуг П1-20/2									
Умови проведення випробувань										
Дата проведення випробувань	20.10.2018 р. (27.10.2018 р.)									
Місце проведення випробувань (господарство)	Фермерське господарство «ЄНІСЕЙ-7» с/гп Ботієве Приазовського району Запорізької області.									
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 електромоблока										
- 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 електромоблока										
- 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 ⁻³ кВт-год/м ³	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 електромоблока для оранки ґрунту від швидкості руху (рис. 4.8), що характеризують умови польових випробувань.

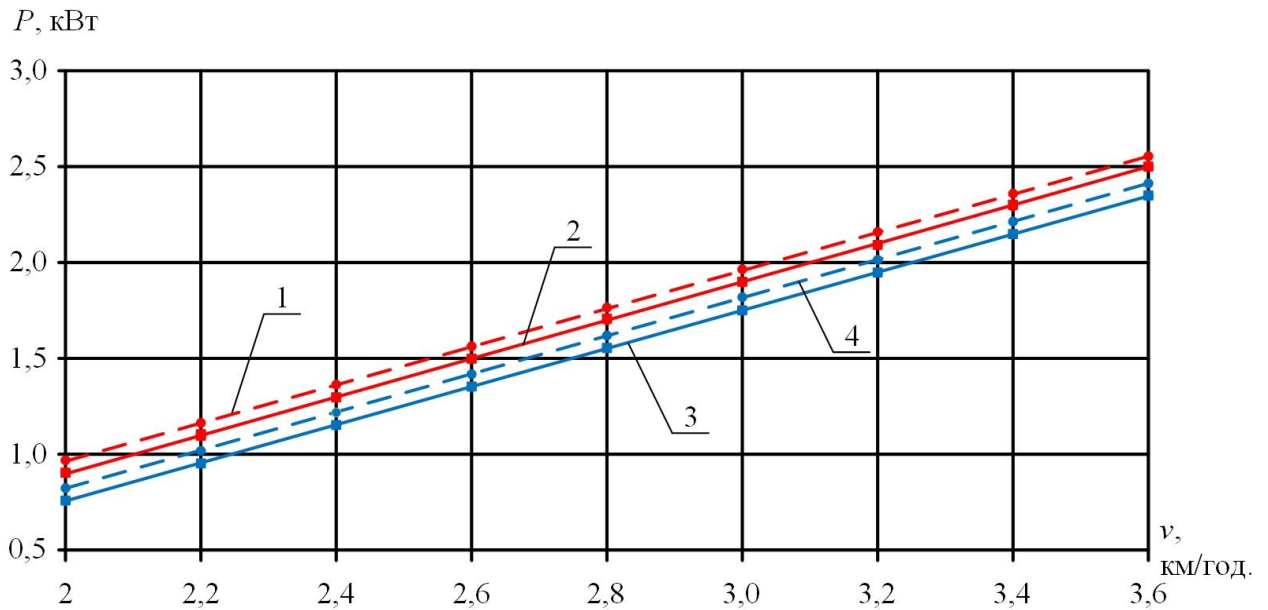


Рисунок 4.8 - Залежність потужності оранки ґрунту P від швидкості руху v електромоблока масою 100 кг при твердості ґрунту $H=1,0$ МПа: експериментальна (1) і розрахункова (2); при твердості ґрунту $H=0,8$ МПа: розрахункова (3) і експериментальна (4)

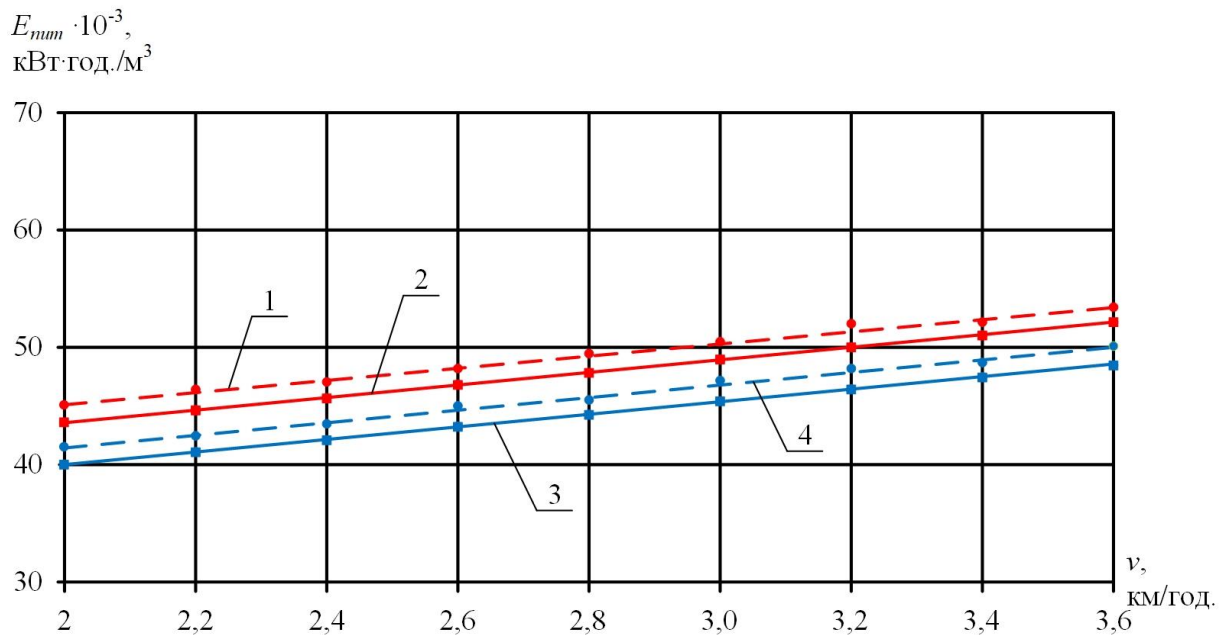


Рисунок 4.9 - Залежність питомої енергоємності E_{num} оранки ґрунту від швидкості руху v електромоблока масою 100 кг при твердості ґрунту $H=1,0$ МПа: експериментальна (1) і розрахункова (2); при твердості ґрунту $H=0,8$ МПа: розрахункова (3) і експериментальна (4)

4.4 Висновки за розділом 4

1. Теоретичними дослідженнями встановлено раціональні параметри електромоблока: потужність приводного електродвигуна $P = 1,0 \dots 3,0 \text{ кВт}$; лінійна швидкість руху $V = 0,6 \dots 1,0 \text{ м / с}$; зчїпна вага $G = 0,5 \dots 1,1 \text{ кН}$. Це дозволило отримати критерій оптимізації - тягове зусилля на рівні $F = 1,5 \dots 3,0 \text{ кН}$.

2. Розроблена система імпульсно-фазового керування забезпечує діапазон регулювання кута α до 210° , асиметрію не більше $1,5^\circ$, тривалість імпульсу не менше 450 мкс , амплітуду імпульсів 20 В , а тривалість переднього фронту імпульсу не більше 15 мкс . Коефіцієнт передачі системи імпульсно-фазового керування становить $9^\circ / \text{В}$, тобто при зміні напруги керування на 1 В кут α змінюється на 9° , що забезпечує виконання умов і характеристик регулювання тягового електродвигуна по максимуму ККД.

3. Аналіз залежностей потужності (рис. 4.8) свідчить про зростання її значень при збільшенні швидкості руху: при твердості ґрунту $H = 1,0 (0,8) \text{ МПа}$ при зростанні швидкості від $2,0$ до $3,6 \text{ км/год.}$ (у $1,8$ рази), потужність збільшується у $2,6$ рази з $1,0 (0,9) \text{ кВт}$ до $2,6 (2,4) \text{ кВт}$ за лінійною залежністю. Інтенсивність зростання потужності перевищує інтенсивність зростання швидкості пересування електромоблока в $1,44$ рази.

4. Аналіз залежностей питомої енергоємності E_{num} оранки ґрунту від швидкості руху v електромоблока (рис. 4.9) свідчить про зростання енергоємності за лінійним законом: при твердості ґрунту $H = 1,0 (0,8) \text{ МПа}$ при зростанні швидкості від $2,0$ до $3,6 \text{ км/год.}$, питома енергоємність збільшується у $1,2$ рази: з $45 \cdot 10^{-3} (42 \cdot 10^{-3})$ до $54 \cdot 10^{-3} (51 \cdot 10^{-3}) \text{ кВт год./м}^3$, що складає $(9 \cdot 10^{-3}) \text{ кВт год./м}^3$.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

5.1 Порівняльна оцінка технічного рівня мотоблоків

Запропонована методика порівняльної техніко-енергетичної оцінки мотоблоків як промислового виробництва, так і розроблених і виготовлених в умовах господарства заснована на визначенні інтегрального коефіцієнта ефективності обладнання з використанням ряду оціночних показників отриманих з паспортних даних мотоблоків [118].

Таблиця 5.1

Технічна характеристика порівнюваних мотоблоків

Показник	М-3	“Супер-610”	МБ-1 (“Луч”)	МТЗ-0,5	“Хонда” F-600	“Кубота” T720E	“Йсеки” KE280	«Січ-Д»	МБ-КЭП
Номинальна потужність двигуна, кВт	2,3	4,4	3,7	3,68	5,0	5,0	3,0	4,4	0,85
Питомі витрати палива, гр./кВт год	394	448	365	448	490	460	400	495	-
Продуктивність, га/ч.	0,15	0,22	0,2	0,26	0,25	0,23	0,13	0,18	0,23
швидкість, км/год	33...11,1	1,42...6	2,5...10	2,15...9,5	2,5...15,0	2,9...14	2,5...5,6	5...10	1...7
кількість передач вперед (назад)	2(0)	3(1)	2(2)	4(2)	6(2)	4(2)	2(1)	2(1)	5(2)
Габаритні розміри, мм									
- довжина	1000	1650	1500	1800	1400	1754	1500	1860	1250
- ширина	600	510	600	850	620	605	550	700	550
- висота	1000	730...1420	1500	1070	880	1190	1100	500	940
Маса, кг	65	90	94	135	100	94	48	140	100

Для техніко-енергетичної оцінки мотоблоків приймаються наступні показники [60,62]. Техніко-енергетичні порівняльні розрахунки виконуємо на прикладі дослідного зразку мотоблока МБ-КЭП.

1. Питома продуктивність $Q_{num.}$, т/кВт·год, визначається

$$Q_{num.} = \frac{Q_{\sigma}}{P}, \quad (5.1)$$

де Q_b – базова паспортна продуктивність, га/ год;

P – встановлена потужність обладнання, кВт.

$$Q_{yd} = \frac{0,23}{0,85} = 0,27 \text{ га} / \text{кВт} \cdot \text{год.}$$

2. Питома металоємність обладнання $M_{nut.}$ визначається

$$M_{nut.} = \frac{G}{Q_{год.}}, \quad (5.2)$$

де G – маса обладнання, ц;

$Q_{год.}$ – продуктивність обладнання, га./год.

$$M_{nut.} = \frac{1,0}{0,23} = 4,34 \text{ ц} \cdot \text{год.} / \text{га.}$$

3. Питомі габаритні розміри $\Gamma_{nut.}$ визначаються

$$\Gamma_{nut.} = \frac{S}{Q_{год.}}, \quad (5.3)$$

де S – площа, яку займає обладнання, м²;

$Q_{год.}$ – продуктивність обладнання, га/год.

$$\Gamma_{nut.} = \frac{0,745}{0,25} = 2,98 \text{ м}^2 / \text{га.}$$

4. Коефіцієнт, що враховує діапазон зміни робочих швидкостей мотоблоків, визначається

$$D = \frac{V_{max}}{V_{min}}, \quad (5.4)$$

де V_{max} – максимальна швидкість мотоблока, м/с;

V_{min} – мінімальна швидкість мотоблока, м/с.

$$D = \frac{7}{1} = 7.$$

Також для порівняльної техніко-енергетичної оцінки мотоблоків використовуємо такі показники, як відносну витрату палива ($Q_{нал.}$, кг/кВт·год), продуктивність (Q , га/год), кількість передач $K_{пер}$, які визначаються з технічних характеристик мотоблоків (таблиця 5.1)

В якості критерію оцінки техніко-енергетичного рівня мотоблоків використовуємо інтегральний коефіцієнт K_{Σ} , який визначається

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \left(2 \pm \frac{(P_i - n) - P_{\min.}}{P_i} \right), \quad (5.5)$$

де P_i – значення i -го показника ряду, який розглядається;

$P_{\min.}$ – значення мінімального з m показників;

n – величина, яка характеризує найбільше відхилення показників ряду, визначається

$$n = \frac{P_{\max.} - P_{\min.}}{m}, \quad (5.6)$$

де $P_{\max.}$ – значення максимального показника ряду.

m – загальна кількість показників, яке використовується для оцінки. У даній роботі приймаємо $m=7$.

У рівнянні (5.5) перед дробом знак «+» використовується якщо показник характеризує позитивний напрямок ряду (наприклад, для питомої продуктивності), а «-» негативне (наприклад для питомої металоємності) [60,62].

Устаткування, яке має більший інтегральний коефіцієнт K_{Σ} є найбільш ефективним, сучасним і перспективним.

Для мотоблока МБ-КЕП інтегральний коефіцієнт дорівнює

$$\begin{aligned} K_{\Sigma} = & \left(2 + \frac{0,25 - 0,96 - 0,25}{0,25} \right) + \left(2 + \frac{0,27 - 0,96 - 0,25}{0,27} \right) + \left(2 - \frac{0 - 0,96 - 0,25}{0} \right) + \\ & + \left(2 + \frac{7 - 0,96 - 0,25}{7} \right) + \left(2 - \frac{7 - 0,96 - 0,25}{7} \right) + \left(2 - \frac{2,98 - 0,96 - 0,25}{2,98} \right) + \\ & + \left(2 - \frac{0,87 - 0,96 - 0,25}{0,87} \right) = 6,9. \end{aligned}$$

Розрахункові значення показників і коефіцієнта K_{Σ} інших мотоблоків визначаються аналогічно. Результати розрахунків техніко-енергетичних показників інших мотоблоків наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Техніко-енергетичні показники мотоблоків

Тип мотоблока	Показник							
	Q , га/год.	$Q_{нит.}$, га/кВт год.	$Q_{паль}$, кг/кВт год.	D , в.о.	$K_{пер}$	$\Gamma_{нит.}$, м ² /га	$M_{нит.}$, ц/кВт	K_{Σ}
М-3	0,15	0,06	0,394	3,36	2	4,0	0,28	4,03
“Супер-610”	0,22	0,05	0,448	4,22	4	3,85	0,20	3,77
МБ-1 (“Луч”)	0,20	0,054	0,365	4,0	4	4,5	0,25	4,01
МТЗ-0,5	0,26	0,07	0,448	4,42	6	5,88	0,37	2,75
“Хонда” F-600	0,25	0,05	0,490	6,0	8	3,47	0,20	3,5
“Кубота” T720E	0,23	0,046	0,460	4,8	6	4,61	0,15	0,6
“Исеки” Ke280	0,13	0,043	0,405	2,24	3	6,34	0,16	5,0
«Січъ-Д»	0,18	0,04	0,495	2,0	3	3,0	0,31	3,1
МБ-КЭП	0,25	0,27	-	7,0	7	2,98	0,87	6,9

Згідно результатів розрахунків наведених в таблиці 5.2, найбільше значення інтегрального коефіцієнта має мотоблок МБ-КЭП ($K_{\Sigma} = 6,9$), що свідчить про високий техніко-енергетичний рівень ґрунтообробного електромоблока.

5.2 Визначення економічної ефективності електромоблока

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 мотоблока з ТЕД можна скористатися Типовою методикою [85], згідно з якою річний економічний ефект нової техніки визначається як різниця приведених витрат порівнюваних мотоблоків з ДВЗ і ТЕД

$$E_{p.} = B_{m.} - B_{e.}, \quad (5.7)$$

де $E_{p.}$ – очікуваний річний економічний ефект мотоблока з ТЕД;

$B_{m.}, B_{e.}$ – річні приведені витрати відповідно мотоблоків з ДВЗ і ТЕД.

При цьому

$$B_{m.} = P_{m.} + E_n \cdot k_{m.}; \quad (5.8)$$

$$B_{e.} = P_{e.} + E_n \cdot k_{e.}, \quad (5.9)$$

де $P_{m.}, P_{e.}$ – річні експлуатаційні витрати на мотоблоки з ДВЗ і ТЕД, грн.;

$k_{m.}, k_{e.}$ – капітальні вкладення, рівні ринковій вартості мотоблоків з ДВЗ і ТЕД, грн.;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Згідно [87,127], при оцінці ефективності засобів малої механізації і автоматизації в сільськогосподарському виробництві рекомендується $E_n = 0,65 \dots 1$. Для подальшого розрахунку приймаємо $E_n = 0,8$.

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

$$P_{m.} = C_{m.} + C_{нал.}; \quad (5.10)$$

$$P_{e.} = C_{e.} + C_{ee}, \quad (5.11)$$

де $C_{m.}, C_{e.}$ – постійні складові експлуатаційних витрат мотоблоків, 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_n, C_{ee} – річні витрати на паливо для мотоблоків з ДВЗ і електроенергію для мотоблоків з ТЕД, грн.

При цьому річні витрати на рідке паливо визначаються за виразом

$$C_n = P_n \cdot q \cdot T_p \cdot \eta \cdot C_n, \quad (5.12)$$

де P_n – номінальна потужність двигуна мотоблока, кВт;

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

T_p – річна тривалість роботи мотоблока в теплиці і на відкритому ґрунті, год.;

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

C_n – вартість одного літра рідкого палива, грн.

Витрати на електроенергію для мотоблока можна визначити за виразом

$$C_{ee} = \frac{P_n \cdot k_3}{\eta_n \cdot K_{e.m.}} \cdot T_p \cdot C_e, \quad (5.13)$$

де P_n – номінальна потужність ТЕД мотоблока, кВт;

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

η_n – номінальний ККД ТЕД мотоблока, в.о.;

$K_{e.m.}$ – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі живлення і гнучкому кабелі. Приймаємо $K_{e.m.} = 0,95$ [48];

C_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 мотоблоків можна прийняти рівними для обох порівнюваних варіантів, тобто.

$$C_m = C_e. \quad (5.14)$$

В результаті вираз (5.7) з урахуванням (5.14) прийме вид

$$E_p = (C_n + E_n K_m) - (C_{e.e.} + E_n K_e). \quad (5.15)$$

Вихідні дані для розрахунків.

Таблиця 5.3

1. Технічні характеристики порівнюваних варіантів мотоблоків

Марка МБ	Паливо	Потужність, кВт	Питома витрата палива, л/кВтгод	Вартість МБ, грн.	Маса МБ, кг
МК-1А-01	А-92	3,9	0,42	10400	80
МБ-2060-Д4	ДП	4,2	0,394	9800	128
МБКЕП, ТДАТУ	Електроенергія	2,5	-	16900	100

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

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

4. Розрахункова вартість одного літра рідкого палива C_n приймається рівною: для ДТ-25 грн./л. і А-92-25 грн./л.

Розрахунок річного економічного ефекту електромоблока.

Річні витрати на рідке паливо і електроенергію порівнюваних варіантів мотоблоків по (5.12) і (5.13) і вихідними даними дорівнюватимуть:

- для МБ Крот МК-1А-01:

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

- для МБ-2060-Д4:

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

- для МБ-КЕП:

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

Річний економічний ефект електромоблока по (5.7) з урахуванням (5.8)-(5.14) і вихідних даних в порівнянні з мотоблоком Крот МК-1А-01:

$$E_{p.1} = (30712 + 0,8 \cdot 10400) - (4697 + 0,8 \cdot 16900) = 20815 \text{ грн.},$$

і в порівнянні з мотоблоком МБ-2060-Д4:

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

Розрахунковий термін окупності витрат на електромоблок з ТЕД в порівнянні з мотоблоками з ДВЗ визначиться як відношення

$$T_1 = \frac{\Delta K_{m1}}{E_{p.1} \cdot k_g} \quad \text{і} \quad T_2 = \frac{\Delta K_{m2}}{E_{p.2} \cdot k_g}, \quad (5.16)$$

де ΔK_{m1} – різниця капітальних вкладень або вартості мотоблоків МБ-КЕП і Крот МК-1А-01;

ΔK_{m2} – різниця капітальних вкладень або вартості мотоблоків МБ-КЕП и МБ-2060-Д4;

k_g – коефіцієнт використання мотоблоку протягом року, в.о. З урахуванням того, що мотоблок експлуатується протягом 2,5 місяця на рік, $k_g = 0,22$;

При цьому

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

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

5.5 Висновки за розділом 5

1. За результатами проведеної техніко-енергетичної оцінки технічного рівня мотоблоків з двигунами внутрішнього згорання та тяговими двигунами становлено, що сумарний інтегральний техніко-енергетичний коефіцієнт електромоблока, який враховує питомі експлуатаційні показники, складає $K_\Sigma = 6,9$, що в 1,4...2,5 разів вищий, ніж у мотоблоків аналогічного класу.

2. Річний економічний ефект від впровадження розробленого електромоблока складає 20,1 тис. грн. при терміні окупності 1,5 року.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та вирішення науково-технічної задачі, яка полягає в підвищенні енергоефективності основних видів обробітку ґрунту за рахунок обґрунтування параметрів і режимів роботи електромоблока.

Отримані теоретичні і експериментальні результати дозволяють зробити наступні загальні висновки.

1. Проведеним аналізом відомих досліджень встановлено, що існуючі конструкції ґрунтообробних мотоблоків не можуть в достатній мірі задовільнити вимогам енергоефективного обробітку ґрунту. Для забезпечення необхідної енергоефективності запропоновано мотоблок з електроприводом постійного струму, який забезпечує зниження питомих енерговитрат на обробіток ґрунту. Для забезпечення електроживлення мотоблока ефективним є спосіб, який передбачає застосування гнучкого кабелю.

2. Теоретичними дослідженнями встановлено раціональні параметри електромоблока: потужність приводного електродвигуна $P = 1,0 \dots 3,0 \text{ кВт}$; лінійна швидкість руху $V = 0,6 \dots 1,0 \text{ м / с}$; зчпна вага $G = 0,5 \dots 1,1 \text{ кН}$. Це дозволило отримати критерій оптимізації - тягове зусилля на рівні $F = 1,5 \dots 3,0 \text{ кН}$.

3. Для формування режиму керування двигуна постійного струму привода електромоблока в режимі пуску необхідне значення напруги живлення обмотки якоря становить $0,05U_n$, що дає можливість забезпечити кратність пускового струму і моменту $M_* = M_{II*} = 2 \dots 3$; $I_* = I_{II*} = 2 \dots 3$ при коефіцієнті ослаблення магнітного потоку $\beta_{оп} = 1$. Для керування ДПС в режимі незмінності споживаної потужності необхідне значення напруги живлення обмотки якоря становить $U_{омт.} = 0,75 \dots 0,9U_n$, що дасть можливість забезпечити керування по максимуму ККД ($\beta_m = const$) при коефіцієнті ослаблення магнітного потоку $\beta_{оп} = 1$. Для керування ДПС в режимі максимальної

швидкості необхідне значення напруги живлення обмотки якоря становить U_n , при коефіцієнті ослаблення магнітного потоку $\beta_{оп} \geq 0,4$.

4. Розроблена система імпульсно-фазового керування забезпечує діапазон регулювання кута α до 210° , асиметрію не більше $1,5^\circ$, тривалість імпульсу не менше 450 мкс , амплітуду імпульсів 20 В , а тривалість переднього фронту імпульсу не більше 15 мкс . Коефіцієнт передачі системи імпульсно-фазового керування становить $9^\circ / \text{В}$, тобто при зміні напруги керування на 1 В кут α змінюється на 9° , що забезпечує виконання умов і характеристик регулювання тягового електродвигуна по максимуму ККД.

При дослідженні спостережника швидкості обертання ДПС привода електромоблока встановлено, що тривалість перехідного процесу не перевищує $1,5 \text{ с.}$, перерегулювання оцінки моменту навантаження складає $4,3\%$, що відповідає заданому розподілу коренів поліному по Батерворту, похибки величин, що регулюються, асимптотично прагнуть до нуля. Відповідно, розроблена система є асимптотично стійкою.

5. Встановлено, що сумарний інтегральний техніко-енергетичний коефіцієнт електромоблока, який враховує питомі експлуатаційні показники, складає $K_{\Sigma} = 6,9$, що в $1,4 \dots 2,5$ разів вищий, ніж у мотоблоків аналогічного класу. Річний економічний ефект від впровадження розробленого електромоблока складає $20,1 \text{ тис. грн.}$ при терміні окупності $1,5$ року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адамчук В.В. Малогабаритные сельскохозяйственные машины. Конструкция, теория и расчет: Монография. Киев, 2016. 292 с.
2. Акимов А.С., Молоснов Н.Ф. Перспективы создания и использования электрифицированной малогабаритной техники. *Тезисы докладов научно-методического совещания на тему: Электрификация мобильных процессов в растениеводстве и животноводстве*. Челябинск. 1983. С. 86-88.
3. Ангилеев О.Г. Повышение эффективности электрифицированного оборудования в фермерских и крестьянских хозяйствах. *Механиз. и электриф. сел. х-ва*. 2002. №10. С. 30-33.
4. Андреев Ю.М., Исаакян К.Г., Машихин А.Д. и др. Электрические машины в тяговом автономном электроприводе. М.: Энергия, 1979. 240 с.
5. Андриенко П.Д., Каплиенко А.О. Шило С.И. и др. Исследование режимов торможения в системе импульсного регулирования серийного электродвигателя. *Електротехніка та електроенергетика*. 2007. № 2. С. 11-14.
6. Андриенко П.Д., Каплиенко А.О., Шило С.И. и др. Исследование динамики серийного электродвигателя с различными импульсными схемами регулирования. *Електротехніка та електроенергетика*. 2007. № 1. С. 4-8.
7. Андрієнко П.Д., Шило С.І., Каплієнко О.О. Дослідження динамічних режимів електродвигуна послідовного збудження з імпульсними схемами регулювання електроприводу. *Електротехніка та електроенергетика*. 2016. № 2. С. 51-58.
8. Аносов В.Н. Использование электрического конденсатора в качестве основного источника питания в тяговом электроприводе автономных транспортных средств. *Труды V Международной конф. по АЭП*. С-Пб.: ГПУ. 2007. С. 488-490.

9. Аунг М.Т., Суздорф В.И. Энергоэффективное управление двигателем последовательного возбуждения/ М.Т. Аунг, В.И. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2017. №5 (123).- С. 137-145.
10. Барков В.А. Полупроводниковые устройства для управления электрическими машинами постоянного тока. Ленинград: ЛПИ им. М.И. Калинина, 1982. 81 с.
11. Бегей С.В., Шувар А.І. Екологічне землеробство: підручник. Львів: «Новий світ–2000». 2007. 429 с.
12. Белозеров В.И., Степаненко В.П.. Актуальность создания карьерных локомотивов с накопителем энергии. *Горная промышленность*. 2014. №4. С.76.
13. Богущкий Ю.О. Розвиток фермерських господарств в Україні. *Економіка АПК*. №6. 1998. С. 25-28.
14. Бондарь В.Н., Кондаков С.В., Новосельский А.Е. Рациональное совмещение характеристик двигателя внутреннего сгорания и электрического привода постоянного тока промышленного трактора. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2006. Вып. 8. № 11(66). С. 85–90.
15. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронным двигателем. М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
16. Бурков В.В., Зикунов Е.П., Иовлев М.Е. Мини-тракторы. Л.: Машиностроение. 1987. 272 с.
17. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. Москва: Агропромиздат, 1986. 416 с.
18. Варакин И.Н., Менухов В.В., Самитин В.В. Перспективы применения электрохимических конденсаторов в составе комбинированных энергосиловых установок на автосамосвалах. *Горная промышленность*. 2008. №3. С.79-86.

19. Варакин И.Н., Менухов В.В., Самитин В.В. Применение электрохимических конденсаторов ЗАО «ЭЛТОН» в составе гибридных энергосиловых установок на карьерном автотранспорте. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2008. С. 106–115.

20. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: «Энергия», 1977. 432 с.

21. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов.. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.

22. Гельфенбейн С.П., Волчанов В.Л. Электроника и автоматика в мобильных сельхозмашинах. Москва.: Агропромиздат, 1986. 264 с.

23. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. СПб.: КОРОНА принт, 2001. 320 с.

24. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: лабораторные работы на ПК. СПб.: Корона принт, 2003. 256 с.

25. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. Л.: Энергия, 1973. 304 с.

26. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. Учеб. для вузов. 2-е изд., испр. М.: Высш. шк., 2000. 255 с.

27. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Электромеханика: учебник для студентов вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 512 с.

28. Гринь Г.С. Полевая диагностика почв. Харьков: ХСХИ, 1974. 222 с.

29. Гуткин Л.В., Борисов Г.П. Энергетическая эффективность рекуперативно-реостатного торможения пригородных электропоездов постоянного тока. Вестник *ВНИИЖТ*. 1987. № 4. С. 20-25.

30. Грунтообробний мотоблок: пат. на кор. мод. 35352, Україна, МПК (2006, 51) B60K1/008. № u 200805379. Опубл. 10.09.2008 р., Бюл. №17.

31. Далека В. Х., Пушков П.М., Андрійченко В.П. та ін. Основи електричної тяги: навч. Посібник. Х.: ХНАМГ, 2012. 312 с.
32. Данилевич Я.Б. Кашарский Э.Г. Добавочные потери в электромашинах. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 214 с.
33. Дашенко А.Ф., Кириллов В.Х, Коломиец Л.В. и др. MATLAB в инженерных и научных расчетах. Одесса: «Астропринт», 2003. 156 с.
34. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 343 с.
35. Ефремов И.С., Пролыгин А.П., Андреев Ю.М. Электрические трансмиссии пневмоколесных транспортных средств. М.: Энергия, 1976. 256 с.
36. Залигин О.Г. Гусаков С.О., Забарский В.П. и др. Малая механизация в приусадебных и фермерских хозяйствах. К.: Урожай, 1996. 367 с.
37. Зимин Е.Н., Кацевич В.Л., Козырев С.К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоиздат, 1981. 192 с.
38. Ильинский Н.Ф. Критерии эффективности электромеханического преобразования энергии. *Электричество*. 1987. №10. С. 24-29.
39. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1992. 533 с.
40. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод и энергоресурсосбережение: учебн. пособ. для студентов ВУЗов. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 208 с.
41. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: учеб. пособие для ВУЗов. М.: МЭИ, 2003. 224 с
42. Ильинский Н.Ф., Романовский Ю.В., Горнов А.О. Энергосбережение в электроприводе. М.: Высшая школа, 1989. 127 с.
43. Исхаков А.С. Динамические свойства выпрямителя в режиме прерывистого тока. *Электричество*. 1982. №12. с. 65-68.

44. Каган В.Г., Лебедев Г.В., Малинин Л.И. Полупроводниковые системы с двигателями последовательного возбуждения. М.: Энергия, 1971. 96 с.
45. Каталог электрооборудования 01.60.05-91 – Машины постоянного тока типа УПБМ, УПНМ и УПНМС. М.: Извана, 1991. 32с.
46. Кауричев И.С., Панков Н.П., Розов Н.Н. Почвоведение. М.: Агропромиздат, 1989. 719 с.
47. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977. 650 с.
48. Квітка С.О., Ковальов О.В. Обґрунтування системи керування електроприводом ґрунтообробного мотоблоку. *Вісник СНАУ*. 2016. Вип. 10/1 (29). – С. 183-186.
49. Кіт М. Г. Морфологія ґрунтів: навч. посіб. Львів: Вид-во ЛНУ ім. Івана Франка, 2008. 227 с.
50. Ключев В. И. Теория электропривода: учебник для ВУЗов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 704 с.
51. Ковалев А.В. Обоснование способа электропитания мотоблока с тяговым электродвигателем. *Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК*: матер. Междунар. науч.-техн. конф./ БГАТУ. Минск, 2017. С. 50-52.
52. 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./ Переяслав-Хмельницький, 2018. С. 673-675.
53. Ковальов О.В. Енергетичний баланс та закон оптимального керування мотоблоком з тяговим електродвигуном постійного струму. *Праці ТДАТУ*. 2008. Вип. 8, т. 5. С. 138-148.
54. Ковальов О.В. Енергозберігаюча система обробітку ґрунту на базі електрифікованого малогабаритного ґрунтообробного мотоблоку. *Збірник тез*

Всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК півдня України»/ Мелітополь, 2015. С. 112-113.

55. Ковальов О.В. Методика розрахунку та вибору тягового електродвигуна в приводі мотоблока. *Вісник ДДАУ*. 2010. Вип. 2. С 80-84.

56. Ковальов О.В. Обґрунтування оптимального режиму керування тяговим двигуном постійного струму мотоблоку. *Праці ТДАТУ*. 2011. Вип. 11, т.3. С. 155-164.

57. Ковальов О.В. Режими роботи електродвигуна приводу ґрунтообробного мотоблоку. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта: Мат. VII Міжнар. наук.-техн. конф. /НУБіП України. Київ, 2018. С. 96-98.*

58. Ковальов О.В. Тягові характеристики та керування мотоблоком з електроприводом по максимуму ККД. *Науковий вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»*. 2008. №30. С. 509-510.

59. Ковальов О.В. Шляхи реалізації енергозбереження засобами агропромислового електропривода. *Сучасні тенденції та перспективи розвитку збалансованого природокористування в агропромисловому виробництві: матер. Міжнар. наук.-практ. конф./ Ніжин, 2015. С. 217-221.*

60. 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.

61. Ковальов О.В., Гулевський В.Б. Електротехнологічна система обробітку ґрунту на базі малогабаритного ґрунтообробного мотоблоку. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): матер. Міжнар. наук.-техн. конф./ НУБіП. Київ, 2016. С. 21-23.*

62. 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*

scientific and practical conference. (December 21-22, 2018)/ Wloclawek, Republic of Poland, 2018. P.117-120.

63. Ковальов О.В., Квітка С.О. Обґрунтування способу керування ДПС приводу мотоблоку. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2011. Вип. 175. С. 146-147.

64. 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.

65. 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.

66. Ковальов О.В., Назар'ян Г.Н., Куценко Ю.М. Аналітичне визначення оптимальних експлуатаційних показників електрифікованого ґрунтообробного мотоблоку. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2011. Вип. 116. С. 108-111.

67. Ковальов О.В., Постнікова М.В. Енергозберігаюча система обробітку ґрунту на базі електрифікованого мотоблоку. Соціально-економічний розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення: мат. міжнар. наук.-практ. конф./ ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут», 2018. С. 356-357.

68. Ковальов О.В., Хандола Ю.М. Комутація в ДПС електропривода ґрунтообробного мотоблоку. *Науково-технічний журнал «Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК»*. 2014. Вип. №1 (1). С. 42-44.

69. Колпахчян Г.И. Электрическая тяга и преобразователи. *Локомотив*. 2000. № 11. С. 32-38.

70. Копылов И.П., Клоков Б.К. Справочник по электрическим машинам. Том 1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 688 .

71. Корчемний М., Савченко І., Гусаков С. Електропривод мобільного агрегату. *Електрифікація*. 1997. №8. С. 30-31.

72. Коцыгин В.В., Горин Г.С. Перспективные мобильные энергетические средства (МЭС) для сельского хозяйства. Мн.: Наука и техника, 1982. 272 с.
73. Ксенович И.П., Варламов Г.П., Колчин Н.Н. и др. Сельскохозяйственные машины и оборудование. Москва, 2002. 720 с.
74. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.
75. Кулагін Д.О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів: Бердянськ: ФОП Ткачук О.В., 2014. 154 с.
76. Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. М.: Транспорт, 1987. 536 с.
77. Кусов Т.Т. Создание энергетических средств с электромеханическим приводом. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1988. № 10. С. 12-15.
78. Лебедев С.П. Этапы и перспективы развития электрификации мобильных сельскохозяйственных агрегатов. *Тезисы докладов научно-методического совещания на тему: Электрификация мобильных процессов в растениеводстве и животноводстве*. Челябинск, 1983. С. 3-4.
79. Листопад Г.Е., Демидов Г.К, Зонов Б.Д. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. М.: Агропромиздат, 1986. С. 446-448.
80. Лобачевский Я.П., Колчина Л.М. Современное состояние и тенденции развития почвообрабатывающих машин. М.: Росинформагротех, 2005. 116 с.
81. Машихин М.Д. Исследование тяговых электрических машин для автомобильной трансмиссии постоянного тока. Автореф. дисс. канд. техн. наук. М.: МИИТ, 1976. 25 с.
82. Медведев В. В. Твердость почв. Харьков: Изд-во КГ1 «Городская типография». 2009. 152 с.

83. Мельников С.В., Алешин В.Р., Рошин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.

84. Метельський В.П. Електричні машини та мікромашини. Запоріжжя: ЗНТУ. 2005. 616 с.

85. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательская и опытно-конструкторских работ. М.: ВНИИПИ, 1983. 149 с.

86. Молоснов Н.Ф., Гоишин М.Д., Акимов А.С. Электрификация мобильных процессов в сельском хозяйстве: Обзорная информация. М.: ВНИИТЭИСХ, 1984. 64 с.

87. Мусин А.М. Технично-економічні показателі мобільних електроагрегатів централізованого електропостачання і перспектива їх розробки. *Матеріали Всесоюзного науково-методического совещання секції Применення електричної енергії в сільському господарстві*. Тбілісі, 1981 г.

88. Мусин А.М., Акимов А.С., Молосков Н.Ф. Обоснование областей применения мобильных электроэнергетических агрегатов централизованного электроснабжения. *Тезисы докладов научно-методического совещания на тему: «Электрификация мобильных процессов в растениеводстве и животноводстве»*. Челябинск. 1983. С. 4-7.

89. Муха В.Д. Агрочвоведение: учебник. Москва: Колос, 1994. 527 с.

90. Мясищев Д.Г., Незговоров С.В. Проектирование мотоблоков с учетом требований эргономики. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1996. №12. С. 20-21.

91. Надикто В.Т., Мітін В.М. До питання визначення коефіцієнта буксування рушіїв модульного енергетичного засобу. *Праці ТДАТА*. 2003. Вип. 11. С. 23-26.

92. Назаренко І.П., Ковальов О.В., Герасименко В.П. Енергозберігаюча система обробітку ґрунту на базі електрифікованого мотоблоку. *Збірник наукових праць «Енергетика і автоматика»*. 2018. № 5(39). С. 48-58.

93. Назарян Г.Н. Практический курс планирования эксперимента. Мелитополь: ТДАТА, 1999. 66 с.

94. Находкин М.Д. Проектирование тяговых электрических машин. М.: Транспорт, 1976. 624 с.

95. Новаковская З.Д. Применение методов планировки эксперимента для решения задач синтеза при проектировании шаговых двигателей. *Труды МЭН*. М.: МЭН, 1972. Вып. 138. С. 165-169.

96. Новиков Ю.Ф. Кабельно-барабанные устройства питания электромобильных машин. *Техника в сельском хозяйстве*. 1978. №3. С. 51-52.

97. Обруч И.В., Кутовой Ю.Н. Замкнутые системы управления электроприводом с двигателем последовательного возбуждения на базе нейронных сетей. *Нейронные сети, фаззи-логика и генетические алгоритмы в электромеханике*. Харьков. 2004. С. 488-490.

98. Овсянников С.И. Управляемость мотоагрегатов. *Вісник СевНТУ*. 2014. № 152. С. 106-109.

99. Онищенко Г. Б. Электрический привод: учебник для вузов. М.: РАСХН, 2003. 320 с.

100. Перльмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.

101. Плаксин А.М. Энергетика мобильных агрегатов в растениеводстве. Челябинск: ЧГАУ, 2005. 204 с.

102. Погорелый Л.В. Инженерные методы испытаний с/х машин. К.: Техника, 1991. 157 с.

103. Погорелый Л.В. Сельскохозяйственная техника и технологии будущего. Киев: Урожай, 1988. 176 с.

104. Потапенко Е.М., Казурова А.Е. Основы теории и методы автоматического управления: учебное пособие. Запорожье: ЗНТУ, 2013. 273 с.

105. Потапенко Е.М., Казурова А.Е. Основы теории автоматического управления. Запорожье: ЗНТУ, 2007. 231 с.

106. Практикум з ґрунтознавства: навч. посіб. за ред. Д. Г. Тихоненка і В. В. Дегтярьова. 6-те вид., змін. і доповн. Харків: Майдан, 2009. 447 с.

107. Прищеп Л. Г. Эффективная электрификация защищенного грунта. М.: Колос, 1980 г.

108. Пролыгин А.П., Машихин А.Д., Минлин А.Б. Регулирование двигателей постоянного тока в электроприводе колесных машин. *Электрическая промышленность тяговое и подъёмно-транспортное электрооборудование*. 1975, Вып. 2(35). С. 9-11.

109. Пушков П.М. Основы электрической тяги: уч. пособие: в 2 ч. Х.: ХГАГХ, 2001. 187 с.

110. Редько И.Я. Определение параметров мобильного электрифицированного агрегата по минимуму приведенных затрат. *Электрификация мобильных сельскохозяйственных агрегатов: научные труды ЧИЭСХ*. Челябинск, 1986. С. 14-23.

111. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. и др. Теория электрической тяги. М.: Транспорт, 1995. 294 с.

112. Романов Ф.Ф. Малогабаритные энергосредства. Выбор оптимальных эксплуатационных параметров. Санкт-Петербург: Агропромиздат, 2000. 182 с.

113. Сельскохозяйственная техника и оборудование для фермерских хозяйств. Каталог. Том 1. М.: Информагротех, 1994. С. 384.

114. Сен П. Тиристорные электроприводы постоянного тока: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.

115. Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение, 1977. 328 с.

116. Соловьев Е.Т. Обоснование тягового диапазона малогабаритного трактора. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2008. №3. С. 37–39.

117. Степанцов А.Д., Андре В.И. Выбор основных параметров тягового электропривода пневмоколесных машин. *Труды ВНИИ*. Стройдормаш, 1973, № 62. С. 55-62.

118. Техника для фермерского хозяйства: мотоблоки и транспортные средства. Библиотека фермера. М.: Информагротех, 1991. Вып.1.

119. Тихоненко Д.Г. Грунтознавство часткове: навч. посіб. Харків: ХНАУ, 2000. 185 с.

120. Тихоненко Д.Г., Горін М.О., Лактіонов М.І. та ін. Грунтознавство: підручник. Київ: Вища освіта, 2005. 703 с.

121. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. Киев: Наук. Думка. 1979. 208 с.

122. Хайлис Г.А., Ковалев М.М. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных. М.: Колос, 1994. 169 с

123. Хвостов В.С. Электрические машины постоянного тока. М.: Высшая школа, 1988. 336 с.

124. Цитович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа. 1983. 288 с.

125. Чигарев Ю.В., Синкевич П.Н. Математические основы механики почв. Минск: УП «Технопринт», 2004. 163 с.

126. Чиликин М.Г. Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1979. 616 с.

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

128. Шмат К.І., Бондарев Є.І., Мігальов О.В. та ін. Випробування і сертифікація техніки АПК. Херсон: ОЛДІ-плюс, 2004. 268 с.

129. Электрификация мобильных сельскохозяйственных агрегатов. *Тезисы докладов научно-методического совещания на тему: “Электрификация*

мобильных процессов в растениеводстве и животноводстве”. Челябинск, 1983. 90 с.

130. Электрификация мобильных сельскохозяйственных агрегатов. *Научные труды ЧИМЭСХ*. Челябинск, 1986. 97 с.

131. Электромобили: состояние и тенденции развития [зарубежный опыт]. М.: Информэлектро, 1988. 24 с.

132. Юхимчук С.Ф. Випробування та сертифікація сільськогосподарської техніки: Навчальний посібник. Луцьк: Ред.-відділ Луцького НТУ, 2017. 136с.

133. Adnan A. Analysis of Speed Control of Series DC Motor Using Diverter and observation of Speed Saturation. *2nd Int. Conf. on Electrical Engineers and information and Communication Technology (ICEECT)*. 2015.

134. Ali Emadi. Energy-Efficient Electric Motors: Selection and Applications. NY : Marcel Dekker, 2004. 424 p.

135. Alotaibi A.M. (2013) Modeling and Motion Control Selection and Design of Electric Motor for Mechatronics Robotics Applications. *International journal of control, automation and systems*. 2013. vol. 1,no 2, ISSN 2165-8277.

136. Aung M.T. *Design of series-wound motor control / V.I. Susdorf , M.T. Aung, A.S. Meshkov. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) Electronic resource*. 2017.

137. Bambang, K. Design and Development of Small Electric Vehicle Using MATLAB. – Institute of Technology, Indonesia, 2011.

138. Bernstein, L., Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change. *Synthesis Report Summary for Policymakers, Available*. Jan. 2008.

139. Chiasson J. Nonlinear Differential-Geometric Techniques for Control of a Series DC Motor. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2015. vol. 2, no. 1. pp. 35-42.

140. Dhameja S., 2002, *Electric Vehicle Battery Systems*, Newnes, United Stated. 2002.
141. Husain I., *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. Pertama. CRC Press, United Stated. 2003
142. Iannuzzi D. Improvement of the Energy Recovery of Traction Electrical Drives using Supercapacitors. *13th International Power Electronics and Motion Control Conference*. 2008. pp. 1469-1474.
143. Kim S., Chung S., Shin W., Lee J. A study of predicting model of an electrical energy balance for a conventional vehicle. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11*. 2008.
144. 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.
145. 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>.
146. Krause P.C. Analysis of electric machinery and drive systems. *IEEE Press*. 2002 c. 76-84.
147. Kunzli N. Public-Health Impact of Outdoor and Traffic Related Air Pollution. *A European Assess-ment, The Lancet*, Vol. 356, Number 9232. 2000. pp. 795-801.
148. Lustenader E. L., Guess R. H., Turnbull F.G., Development of a Hybrid Flywheel Battery Drive System for Electric Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. VT-26. 1977, pp.135-143.

149. Maghfiroh H., Ataka Ah., Wahyunggoro O., Cahyadi A.I. Optimal Energy Control of DC Motor Speed Control: Comparative Study. *International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications*. 2013. pp. 89-93.

150. Patterson, P. Quantifying the Fuel Use and GHG Reduction Potential of EVs and HEVs. *Available*. April 26. 2002.

151. Powell B.K., Bailey, K.E. Cikanek S.R. Dynamic Modeling and Control of Hybrid Electric Vehicle Powertrain Systems, *IEEE Control Systems*. October. 1998.

152. Richard, A. Mathematical Modelling and Simulation of a PWM Inverter Controlled Brushless Motor Drive System from Physical Principles for Electric Vehicle Propulsion Applications.. *Cork Institute of Technology*, Ireland. 2011. doi: 10.5772/16652

153. Septimu M., Liviu, T. Behavior of the Lead Acid Battery after the Rest Period. *WSEAS TRAN-SACTIONS on POWER SYS-TEMS*. Issue 3, Volume 3. March. 2008.

154. Wood J.H., Long G.R., More-house D.F., Long Term World Oil Supply Scenarios: *The Future Is Neither as Bleak or Rosy as Some Assert*, US Department of Energy. 2004. Available Jan. 2008.

155. Ying S., Ding S., Yang J., Hung R. Electrochemistry Theorem Based State-of-Charge Estimation of the Lead Acid Batteries for Electric Vehicles. *WSEAS Transactions on Systems*. Issue 10. Volume 7. 2008, pp.10-92.

ДОДАТОК А





УКРАЇНА

(19) UA (11) 35352 (13) U
 (51) МПК (2006)
 B60K 1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
 І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ

ОПИС
 ДО ПАТЕНТУ
 НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

в ідається під
 в ідповідальність
 в ласника
 патенту

(54) ҐРУНТООБРОБНИЙ МОТОБЛОК

1

(21) u200805379

(22) 24.04.2008

(24) 10.09.2008

(46) 10.09.2008, Бюл. № 17, 2008 р.

(72) КАТЮХА АНАТОЛІЙ АНДРІЙОВИЧ, UA, КО-
 ВАЛЬОВ ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ, UA, СМУРИ-
 ГІН ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ, UA(73) ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНО-
 ЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, UA

2

(57) Ґрунтообробний мотоблок, що містить раму, привідний електродвигун, колеса, робочі органи, який відрізняється тим, що він оснащений пристроєм керування, який складається з блока задання напруги, вузла порівняння, підсилювачів, керованого регулятора постійної напруги, привідного двигуна постійного струму, блока тензодатчиків та блока живлення, які з'єднані між собою в єдину замкнену систему.

Корисна модель відноситься до галузі електротехніки, зокрема до пристроїв керування електродвигунами з двигунами постійного струму.

Існують пристрої для обробки ґрунту - мотоблоки, які складаються з наступних основних конструктивних елементів: рами, трансмісії, приводного двигуна внутрішнього згоряння, коробки зміни передач, муфти зчеплення, та набору навісних знарядь. Недоліками таких пристроїв є великі питомі енерговитрати на обробку ґрунту, великий рівень шуму та вібрації, загазованість повітря. Пристрій керування малогабаритним ґрунтообробним мотоблоком розроблений на основі винаходу, може бути використаний для усунення негативного впливу зворотного в'язкого тертя на енергетичні показники роботи агрегату у випадку виникнення проковзування привідних коліс при обробці ґрунту.

Найбільш близьким технічним рішенням, обраним як найближчий аналог, є електрифікований мотоблок МТЗ-05 з приводом від асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, який складається з рами, приводного електродвигуна, трансмісії, кабелю живлення, робочих органів та баластних вантажів. [Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1998, №10, стр.12-15. "Создание энергетических средств с электромеханическим приводом"].

Однак, при застосуванні додаткових баластних вантажів для боротьби з проковзуванням, підвищуються питомі витрати на обробку ґрунту, а також відбувається додаткове переущільнення орного шару ґрунту, що є негативним явищем.

В основу корисної моделі поставлена задача удосконалення ґрунтообробного мотоблока за рахунок його оснащення пристроєм керування, що дозволяє контролювати та підтримувати необхідну частоту обертання приводного електродвигуна постійного струму, і як наслідок - збільшується (при необхідності) момент зчеплення ведучих коліс з ґрунтом, дає можливість не використовувати коробку зміни передач, муфту зчеплення та додаткові баластні вантажі, що зменшує переущільнення ґрунту колесами та суттєво знижує питомі енерговитрати на процес обробки ґрунту.

Поставлена задача вирішується тим, що ґрунтообробний мотоблок, що містить раму, привідний електродвигун постійного струму, колеса, ґрунтообробні органи, відповідно до корисної моделі, оснащений пристроєм керування, який складається з блока задачі напруги, вузла порівняння, підсилювачів, керованого регулятора постійної напруги, приводного двигуна постійного струму, блока тензодатчиків та блока живлення, які з'єднані між собою в єдину замкнену систему.

Застосування пристрою керування дозволяє автоматично порівнювати вихідну напругу тензомосту з базовою напругою, що подається з датчика і через відповідні блоки керування регулювати частоту обертання приводного двигуна, і як слідство лінійну швидкість пересування агрегату.

Сутність і принцип роботи запропонованого технічного рішення пояснюється кресленням, на якому зображена структурна схема пристрою керування ґрунтообробним мотоблоком.

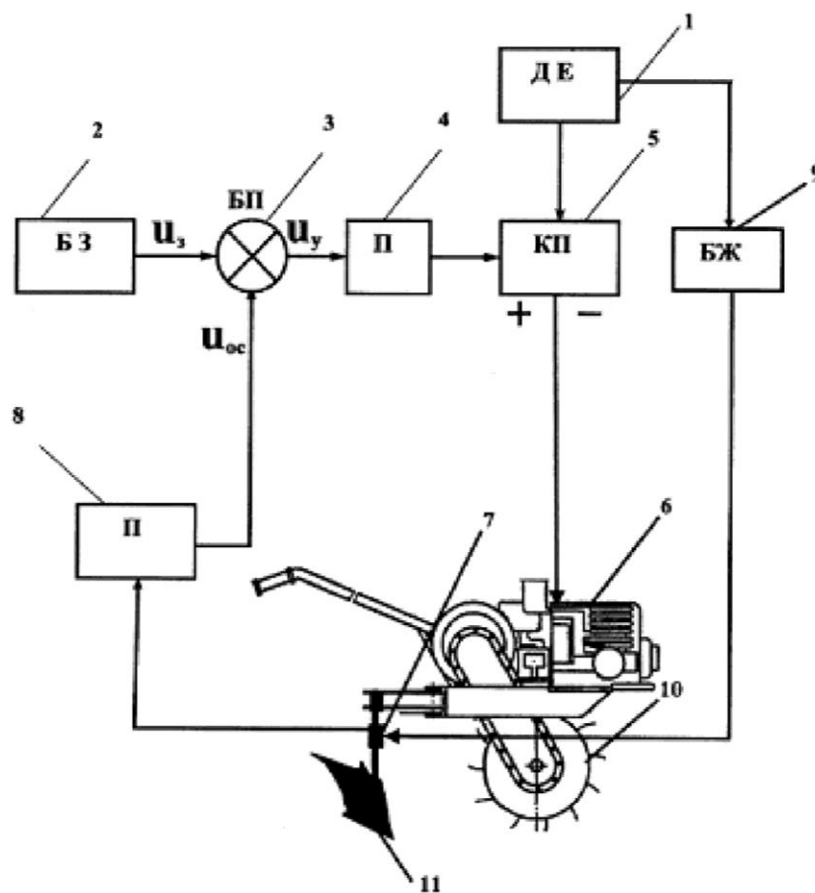
Пристрій для здійснення корисної моделі складається з джерела електричної енергії 1, бло-

(19) UA (11) 35352 (13) U

ка задачі напруги 2, вузла порівняння 3, підсилювача 4, керованого регулятора постійної напруги 5, приводного електродвигуна 6, блока тензодатчиків 7, підсилювача 8, блока живлення тензомосту 9, приводних коліс 10.

Принцип роботи пристрою полягає в наступному: у випадку відсутності пробуксовування (ґрунт однорідний з твердістю, що не перевищує заданого значення) величина напруги задатчика і напруги що знімається з тензодатчиків, однакові. У випадку збільшення навантаження на робочій орган у наслідку його застрягання в ґрунті, змінюється величина опорів тензодатчиків, збільшується

сигнал розбалансу тензомосту 7, який подається на підсилювач сигналу 8. Сигнал з підсилювача подається на вузол порівняння 3, на його виході з'являється сигнал, який є різницею між сигналом задачі і сигналом з підсилювача 8, який подається на керований випрямлювач 5, завдяки чому його вихідна напруга знижується, також знижується частота обертання двигуна постійного струму 6 приводу мотоблока, і, відповідно, швидкість руху агрегату. У наслідок цього відбувається збільшення моменту зчеплення коліс з ґрунтом, ефект пробуксовування коліс (буксування) зникає.



Фіг.

ДОДАТОК Б

ДОГОВІР № 312-К про наукове консультування

м. Мелітополь

«22» березня 2016 р.

Таврійський державний агротехнологічний університет, іменованій надалі «**Виконавець**», в особі ректора д.т.н., професора Кюрчева Володимира Миколайовича, що діє на підставі Статуту університету, з одного боку, і фермерське господарство «СНІСЕЙ-7», іменоване надалі «**Замовник**», в особі голови Попова Олександра Степановича, що діє на підставі Статуту підприємства, з іншого боку, які надалі разом іменуються Сторони, уклали цей договір про наступне:

1 ПРЕДМЕТ ДОГОВОРУ

1.1 **Замовник** доручає, а **Виконавець** приймає на себе зобов'язання надати наукові послуги у сфері електроприводу та силової електроніки.

1.2 Наукове консультування здійснюється на основі добровільної участі сторін і полягає у наданні сучасної науково-технічної інформації, яку за письмовим чи усним замовленням **Замовника** передає **Виконавець** в особі старшого викладача кафедри «Електротехніка і електромеханіка» Ковальова Олександра Вікторовича та доцента кафедри «Електротехніка і електромеханіка» Постнікової Марини Вікторівни.

1.3 Наукове консультування здійснюється на безоплатній основі.

1.4 За виконане консультування **Замовник** надає **Виконавцю** право використання виробничих площ та обладнання для проведення наукових експериментів у сфері електроприводу сільськогосподарської техніки та систем керування і захисту електроприводів постійного та змінного струму.

2 ОBOB'ЯЗКИ СТОРІН

1.5 **Виконавець** зобов'язаний за усним чи письмовим замовленням **Замовника** консультувати його за такими напрямками:

- консультування у сфері проектування електроприводів сільськогосподарського призначення;
- консультування у сфері експлуатації електроприводів сільськогосподарського призначення;
- консультування у сфері проектування систем керування і захисту електроприводів сільськогосподарського призначення.

1.6 **Замовник** зобов'язаний за усним чи письмовим замовленням **Виконавця** надавати виробничі площі та обладнання для проведення наукових експериментів за такими напрямками:

- системи захисту електроприводів;
- енергозберігаючі системи керування і захисту електроприводів.

3 ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ СТОРІН

3.1 Всі спори між сторонами, по яким не була досягнута згода, вирішуються шляхом переговорів.

3.2 Сторони встановлюють, що всі можливі претензії за даною угодою мають бути розглянуті сторонами протягом 30 днів з дня отримання претензії.

4 ТЕРМІН ДІЇ ДОГОВРУ

4.1 Договір діє з дня підписання і до його розірвання по взаємній згоді сторін або за ініціативою однієї сторони.

4.2 Умовами розірвання договору є письмове повідомлення однієї із сторін про бажання розірвати договір не менше ніж за два місяці до передбачуваного терміну розірвання.

5 ІНШІ УМОВИ

5.1 **Замовник** зобов'язаний дотримуватись умов конфіденційності: не передавати іншим особам інформацію про предмет цього договору протягом терміну дії договору, а також протягом трьох років після його закінчення.

5.2 **Виконавець** зобов'язаний дотримуватись умов конфіденційності: не передавати іншим особам інформацію про наукові розробки, які здійснює Замовник, протягом терміну дії договору, а також протягом трьох років після його закінчення.

5.3 Цей договір складено у двох оригінальних примірниках, що мають однакову юридичну силу, по одному для кожної із сторін.

МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ТА РЕКВІЗИТИ СТОРІН

Замовник:

**Фермерське господарство
«ЄНІСЕЙ-7»**
72431, Запорізька обл.,
Приазовський район, с. Ботієве,
вул. К. Маркса, 7,
ЄДРПОУ 33853072, реєстраційний
номер 1093100003000325

Голова ФГ «ЄНІСЕЙ-7» О.С. Попов



Виконавець:

**Таврійський державний
агротехнологічний університет**
72310, м. Мелітополь,
пр-т Б. Хмельницького, 18,
ЄДРПОУ 00493698
р/р 31259217102221, МФО 820172

Ректор університету,
доктор технічних наук,
професор

В.М. Кюрчев



ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Ректор ТДАТУ
 д.т.н., професор
 Кюрчев В.М.
 14 травня 2017 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Голова
 ФГ «Єнісей-7»
 Попов О.Є.
 14 травня 2017 р.

А К Т

впровадження результатів науково-дослідних робіт

14 травня 2017 р.

Ми, що нижче підписалися, представники Таврійського державного агротехнологічного університету (ТДАТУ) Ковальов О.В., ст. викладач кафедри електротехніки і електромеханіки та Федькін В.А., студент 32 ЕН групи

(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

з однієї сторони

і представники ФГ «Єнісей-7»

(найменування підприємства, організації)

голова Попов О.Є. та головний енергетик Роговий А.О.

(прізвище, ім'я, по-батькові)

з іншої сторони

склали цей акт о тому, що в результаті проведення науково-дослідних робіт по темі «Енергозберігаючі режими роботи електромеханічних систем обробітку ґрунту»

впроваджено малогабаритний електрифікований ґрунтообробний мотоблок

(найменування машини, процесу, пристрою)

В процесі впровадження виконані наступні роботи:

1 Проведено основні види обробітку ґрунту з використанням малогабаритного електрифікованого ґрунтообробного мотоблоку.

2 Виявлені фактори, що оказують найбільший вплив на питомі витрати електроенергії при обробітку ґрунту.

3 Визначені оптимальні параметри і режими роботи малогабаритного електрифікованого ґрунтообробного мотоблоку.

Від впровадження отриманий наступний техніко-економічний ефект:

Оптимізація режимів роботи електромеханічної системи обробітку ґрунту на базі малогабаритного ґрунтообробного мотоблоку дозволить знизити питомі витрати електроенергії на обробіток ґрунту на 10-12 %.

Пропозиції з подальшого впровадження результатів роботи:

Малогабаритний електрифікований ґрунтообробний мотоблок планується використовувати в якості допоміжного агрегату при обробітку ґрунту, в місцях де немає можливості використання крупних ґрунтообробних машин.

Представники ТДАТУ

Ст. викладач каф. ЕТЕМ
Ковальов О.В.

Федькін В.А.



Представники ФГ «Єнісей-7»

Інженер-енергетик Роговий А.О.

Голова Попов О.С.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор ТДАГУ імені Дмитра Моторного
 Д.Т.Н., професор,
 член-кореспондент УААН України
 Кюрчев В.М.

« 19 » лютого 20 20 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Голова
 ПП «Модуль-2000»
 Толстошеєв В.М.

« 18 » лютого 20 20 р.

**А К Т****впровадження результатів науково-дослідних робіт**

«18» лютого 2020 р.

Ми, що нижче підписалися, представники Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного Ковальов Олександр Вікторович, старший викладач кафедри електротехніки і електромеханіки імені професора В.В. Овчарова

(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

з однієї сторони

і представник ПП «Модуль-2000»

(найменування підприємства, організації)

директор Толстошеєв Віктор Миколайович

(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

з іншої сторони

склали цей акт о тому, що в результаті проведення науково-дослідних робіт по темі «Розробка та удосконалення енергозберігаючої електромеханічної системи обробітку ґрунту»

впроваджено пристрій керування і захисту електродвигуна приводу малогабаритного ґрунтообробного мотоблоку

(найменування машини, процесу, пристрою)

В процесі впровадження виконані наступні роботи:

- 1 Виявлені основні негативні фактори впливу на працездатність електродвигуна приводу ґрунтообробного мотоблоку.
- 2 Проведено обґрунтування елементів та розробку схеми пристрою керування і захисту електродвигуна приводу ґрунтообробного мотоблоку.
- 3 Проведено випробування пристрою керування і захисту електродвигуна приводу ґрунтообробного мотоблоку.

Від впровадження отриманий наступний техніко-економічний ефект:

Впровадження пристрою керування і захисту електродвигуна приводу ґрунтообробного мотоблоку дозволяє знизити питомі енерговитрати на основний процес обробітку ґрунту на 8-10% та збільшити ресурс роботи електродвигуна на 10-12%.

Пропозиції з подальшого впровадження результатів роботи:

Пристрій після незначного удосконалення може бути використаний для керування і захисту електродвигунів приводу робочих машин і механізмів широкого спектру застосування

Представник ТДАТУ імені
Дмитра Моторного:

ст. викладач кафедри ЕТЕМ

імені професора В.В. Овчарова

Ковальов О.В.

Представник ПП «Модуль-2000»:

Директор Толстошеєв В.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор ТДАТУ імені Дмитра Моторного
 д.т.н., професор,
 член-кореспондент УААН України
 Кюрчев В. М.

« 03 » лютого 20 20 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
 ТОВ «Магніт»
 Уколов С. М.

« 03 » лютого 20 20 р.



А К Т

впровадження результатів науково-дослідних робіт

« 03 » лютого 20 20 р.

Ми, що нижче підписалися, представники Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного (ТДАТУ)

Ковальов Олександр Вікторович, старший викладач кафедри

електротехніки і електромеханіки імені професора В.В. Овчарова з однієї сторони

(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

і представник ТОВ «Магніт»,

(найменування підприємства, організації)

директор Уколов Сергій Миколайович з іншої сторони

(прізвище, ім'я, по-батькові)

склали цей акт про те, що в результаті проведення науково-дослідних робіт по темі «Обґрунтування режимів роботи електроприводу малогабаритного ґрунтообробного мотоблоку»

впроваджено спостережник швидкості обертання електродвигуна приводу малогабаритного ґрунтообробного мотоблоку

(найменування машини, процесу, пристрою)

В процесі впровадження виконані наступні роботи:

1 Проведено обґрунтування та розробка структурно-функційної схеми керування електродвигуном приводу мотоблоку.

2 Виконано синтез спостережника швидкості обертання електродвигуна приводу мотоблоку.

3 Проведено дослідження працездатності та основних властивостей спостережника швидкості обертання електродвигуна приводу мотоблоку.

Від впровадження отриманий наступний техніко-економічний ефект:

Впровадження спостережника швидкості в процес керування електродвигуном приводу мотоблоку за рахунок виключення з системи ненадійного елемента давача швидкості, дозволяє підвищити швидкодію, надійність та точність роботи системи на 15-20 %.

Пропозиції з подальшого впровадження результатів роботи:

Після незначного удосконалення спостережник швидкості обертань електродвигуна може бути використаний в системах автоматизованого керування електроприводами широкого спектру застосування.

Представник ТДАТУ імені
Дмитра Моторного:

ст. викладач кафедри ЕТЕМ

імені професора В.В. Овчарова

Ковальов О.В.

Представник ТОВ «Магніт»:

Директор

Уколов С.М.