



**LEVEL OF DEVELOPMENT
OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
IN THE XXI CENTURY**

HE

'2024



**MONOGRAPHIC SERIES
«EUROPEAN SCIENCE»**

**BOOK 32
PART 1**

SWorld

Germany



*Kovalenko V., Gurin I., Zirnieiev S., Lysenko V., Siverskyi S.,
Stepanenko O., Kitayev O., Doskoch V.*

**DER STAND DER ENTWICKLUNG VON
WISSENSCHAFT UND TECHNIK IM XXI
JAHRHUNDERT**

**SYNTHESE DES SYSTEMS ZUR STABILISIERUNG DER DREHFREQUENZ DES
ASYNCHRONMOTORS DES ELEKTRISCHEN ANTRIEBS DES ROTORRADS DES
BAGGERS ERSHR-1600 DES POKROVSKY-STEINBRUCHS**

***THE LEVEL OF DEVELOPMENT OF SCIENCE AND
TECHNOLOGY IN THE XXI CENTURY***

**SYNTHESIS OF THE SYSTEM OF STABILIZATION OF THE ROTATION FREQUENCY OF
THE ASYNCHRONOUS MOTOR OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE ROTOR WHEEL OF
THE EXCAVATOR ERSHR-1600 OF THE POKROVSKY QUARRY**

Monographic series «European Science»

Book 32. Part 1.

*In internationalen wissenschaftlich-geometrischen Datenbanken enthalten
Included in International scientometric databases*

MONOGRAPHIE

MONOGRAPH

*ScientificWorld-Net Akhat AV
Karlsruhe 2024*

Authors:

Kovalenko V., Gurin I., Zirnieiev S., Lysenko V., Siverskyi S.,
Stepanenko O., Kitayev O., Doskoch V.

Reviewers:

Chorny Oleksii, Doctor of Science, Director of the Educational and Scientific Institute of
Electromechanics, Energy Saving and Control Systems, Kremenchuk Mykhailo
Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

Tytiuk Valerii, Doctor of Science, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

**Der Stand der Entwicklung von Wissenschaft und Technik im XXI
Jahrhundert:** Synthese des Systems zur Stabilisierung der Drehfrequenz des
Asynchronmotors des elektrischen Antriebs des Rotorrads des Baggers
ERSHR-1600 des Pokrovsky-Steinbruchs. Monografische Reihe «Europäische
Wissenschaft». Buch 32. Teil 1. 2024.

**The level of development of science and technology in the XXI
century:** Synthesis of the system of stabilization of the rotation
frequency of the asynchronous motor of the electric drive of the rotor
wheel of the excavator ERSHR-1600 of the pokrovsky quarry.
Monographic series «European Science». Book 32. Part 1. 2024.

ISBN 978-3-98924-058-2

DOI: 10.30890/2709-2313.2024-32-01

Published by:

ScientificWorld-NetAkhatAV

Lußstr. 13

76227 Karlsruhe, Germany

e-mail: editor@promonograph.org

site: <https://desymp.promonograph.org>

Copyright © Authors, 2024

Copyright © Drawing up & Design. ScientificWorld-NetAkhatAV, 2024



ÜBER DIE AUTOREN / ABOUT THE AUTHORS

1. *Kovalenko Viktor*, Doctor of Technical Sciences, prof. Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Zaporizhzhia National University, ORCID 0000-0001-5950-4412
2. *Gurin Ievgen*, graduate student, Zaporizhzhia National University, ORCID 0009-0006-1346-5191
3. *Zirnieiev Sergii*, student, Warsaw Management University, ORCID 0009-0001-0327-3763
4. *Lysenko Vladyslav*, student, Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University, ORCID 0009-0002-6026-4406
5. *Siverskyi Serhii*, graduate student, Zaporizhzhia National University, ORCID 0009-0004-8457-8789
6. *Stepanenko Oleg*, graduate student, Ukrainian State University of Science and Technologies, ORCID 0009-0000-0924-6291
7. *Kitayev Oleg*, graduate student, Ukrainian State University of Science and Technologies, ORCID 0009-0000-6421-8269
8. *Doskoch Volodymyr*, graduate student, graduate student, Ukrainian State University of Science and Technologies, ORCID 0000-0002-9991-1650



Inhalt / Content

INTRODUCTION / ВСТУП	6
----------------------------	---

CHAPTER 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Організація екскаваторних робіт. Ґрунти та їх властивості.	8
1.2. Характеристики, сучасний стан і перспективи розвитку конструкцій компактних роторних екскаваторів.....	14
1.3. Мета і задачі дослідження.....	27

CHAPTER 2

ІННОВАЦІЙНО-ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

2.1. Аналіз кінематики і навантажень роторного екскаватора.....	29
2.2. Характеристика електроприводу роторного колеса.....	41
2.3. Перспективи розвитку електроприводу.....	46
2.4. Визначення параметрів схеми заміщення.....	47
2.5. Розрахунок статичних характеристик.....	52
2.6. Розрахунок енергетичних характеристик електроприводу	65
2.7. Розробка математичної моделі електроприводу	66
2.8. Розрахунок динамічних режимів в розімкнутій системі електроприводу	70
2.9. Розрахунок динамічних режимів в замкнутій системі електроприводу ..	76
2.10. Висновки до розділу	81

CONCLUSIONS / ВИСНОВКИ.....	82
-----------------------------	----

REFERENCES / ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	83
------------------------------------	----



Liste der bedingten bezeichnungen / List of terms

ЕРШР – екскаватор роторний крокуючий рейковий;

СК – система керування;

ПЕ – перетворювач енергії;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ТПМ – типові промислові механізми;

ЕП – електропривод;

АД – асинхронний двигун;

ПЧ–АД – система перетворювач частоти–асинхронний двигун;

СУОП – система управління охороною праці;

ПУЕ – правила умов експлуатації;

НПАОП – нормативно-правові акти з охорони праці.



Einführung / Introduction

В сучасних умовах ведення відкритих гірничих робіт спостерігається тенденція істотного приросту відстані транспортування, що пов'язано з постійним поглибленням кар'єрів і видаленням відвалів від їх кордонів.

Екскаватори роторні відносяться до типу кар'єрних повноповоротних машин і призначені для ведення розкривних і видобувних робіт на відкритих розробках корисних копалин. Забезпечують навантаження витягнутої гірської маси на транспортують машини безперервного дії (забійний конвеєр, перевантажувач, отвалообразователь), в залізничний або автомобільний транспорт. Екскаватори пристосовані для цілорічних робіт в інтервалі температур від - 40 до + 35 ° С. Виконання машин з роторної стрілою постійної довжини (невисувними) забезпечує високу жорсткість і надійність конструкції при мінімальних вагових показниках. Виконання верхньої будови машини з центральної перевантаженням (при загальній осі обертання для поворотної платформи машини і розвантажувальної стріли) спрощує схему машин, зводить до мінімуму число стрічкових конвеєрів. Є тільки два конвеєра приймальний і розвантажувальний, що полегшує обслуговування робочого процесу транспортування. У кабінах машиністів встановлено апаратура управління і зв'язку. Для виробництва поточного ремонту на машинах є майстерні. Екскаватори обладнані необхідною кількістю вантажопідіймальних засобів, що дозволяють проводити ремонтні роботи в процесі експлуатації: барабанною лебідкою, консольним поворотним краном з електроталь. Електрообладнання розміщено в приміщеннях, розташованих на консолі противаги і поворотною дозволяють проводити ремонтні роботи в процесі експлуатації: барабанною лебідкою, консольним поворотним краном з електроталь. Електрообладнання розміщено в приміщеннях, розташованих на консолі противаги і поворотною дозволяють проводити ремонтні роботи в процесі експлуатації: барабанною лебідкою, консольним поворотним краном з електроталь. Електрообладнання розміщено в приміщеннях, розташованих на консолі противаги і поворотною



платформи. Струмознімальних пристрої герметизовані і надійно працюють в умовах великої запиленості.

Застосування циклічно-потокової технології на окремо взятій ділянці призведе до інтенсифікації робіт і відповідного зростання виробничої потужності. Таким чином, метою складання проекту стало рішення стоїть перед підприємством проблеми підвищення ефективності розкривних робіт роторними екскаваторами.



КАПИТЕЛ 1 / CHAPTER 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Організація екскаваторних робіт. Ґрунти та їх властивості

Екскаватори роторні відносяться до типу кар'єрних повноповоротних машин і призначені для ведення розкривних і видобувних робіт на відкритих розробках корисних копалин. Забезпечують навантаження витягнутої гірської маси на транспортують машини безперервного дії (забійний конвеєр, перевантажувач, отвалообразователь), в залізничний або автомобільний транспорт. Екскаватори пристосовані для цілорічних робіт в інтервалі температур від - 40 до + 35 ° С. Виконання машин з роторної стрілою постійної довжини (невисувними) забезпечує високу жорсткість і надійність конструкції при мінімальних вагових показниках. Виконання верхньої будови машини з центральної перевантаженням (при загальній осі обертання для поворотної платформи машини і розвантажувальної стріли) спрощує схему машин, зводить до мінімуму число стрічкових конвеєрів. Є тільки два конвеєра приймальний і розвантажувальний, що полегшує обслуговування робочого процесу транспортування. У кабінах машиністів встановлено апаратура управління і зв'язку. Для виробництва поточного ремонту на машинах є майстерні. Екскаватори обладнані необхідною кількістю вантажопідіймальних засобів, що дозволяють проводити ремонтні роботи в процесі експлуатації: барабанною лебідкою, консольним поворотним краном з електроталь. Електрообладнання розміщено в приміщеннях, розташованих на консолі противаги і поворотній платформі. Струмознімальні пристрої герметизовані і надійно працюють в умовах великої запиленості. Для виробництва поточного ремонту на машинах є майстерні. Екскаватори обладнані необхідною кількістю вантажопідіймальних засобів, що дозволяють проводити ремонтні роботи в процесі експлуатації: барабанною лебідкою, консольним поворотним краном з електроталь. Електрообладнання розміщено в приміщеннях, розташованих на консолі противаги і поворотній платформі. Виготовлялися роторні кар'єрні екскаватори



на Воронежському екскаваторному заводі, Донецькому заводі ім.15-річчя ЛКСМУ (нині "Донецькгірмаш") і НКМЗ.

Грунти є матеріалами, з якого зводять насипу, середовищем, в якій розробляють виїмки, і підставою, на якому зводять земляні споруди. Велика частина ґрунтів – мінерального походження, але є ґрунти частково або повністю органічного освіти (мул, торф, чорнозем, фосфорити). Грунти мінерального походження за своїм складом, міцності і труднощі розробки поділяють на скельні (вивержені і осадові), зцементовані конгломерати і нескельні (глинисті і піщано-гравійні). Скельні ґрунти за будовою поділяють на однорідні і шаруваті. Однорідні скельні ґрунти складаються переважно з вивержених порід з кристалічною структурою. Вони відрізняються значною щільністю (обсяг пір не більше 1%) і малої вологоємністю (0,1 - 1%). Шаруваті скельні ґрунти належать до осадових порід і складені з пісковиків, вапняків, доломіту і глинистих сланців. Міцність цих порід коливається в широких межах і залежить як від складу і будови, так і від товщини шару. Вологоємність коливається від 1,5% для щільних вапняків до 40% для мела. Конгломерати - це уламкові породи, зцементовані тим чи іншим мінеральним цементом. Твердість породи залежить від складу зв'язуючого. До нескельних ґрунтів відносяться глини, лес, мергелі, піски і гравій, а до проміжних - супіски, суглинки. Глини є продуктом механічного розкладання польового шпату. У чистому вигляді глини зустрічаються рідко. Зазвичай вони містять домішки піску і інших гірських порід. При утриманні 10 - 30% глини їх називають суглинками, а при утриманні її 10% і менше - супесямі. Лес містить 5 - 10% глини, до 60% кварцового пилу, 10 - 20% вапна і деяку частину окису заліза. Лес володіє значною вологоємністю (до 40%). При насиченні водою в лесі порушується зчеплення частинок, тому вони легко розмиваються текучими водами. Мергелямі називаються глини з вмістом 40 - 60% вуглекислого вапна. У сухому стані мергелі мають значну твердістю. Вони гігроскопічні, при насиченні водою переходять в стан пластичності, а при висиханні розпадаються в порошок. Піски - це продукт руйнування кристалічних порід. Крупність частинок піску - в межах від 0,05 (дрібний пісок) до 3 - 4 мм



(великий пісок). При більш дрібних зернах піски називають пилом. Гравій, галька і валуни - це грубоуламкові породи, що складаються з продуктів руйнування вивержених і осадових порід. Розміри окремих частинок: 5 - 40 - для гравію, 40 - 200 - для гальки і 200 - 800 мм - для валунів. Технічна придатність ґрунтів визначається зчепленням між частинками, що характеризує міцність ґрунту; розмірами і формою частинок; однорідністю складу; коефіцієнтом тертя або кутом природного укосу; вологістю, волого-ємністю і водоутримуючою здатністю; размиваємість і розчиненість в воді; пластичністю; розширюваністю і сжимаемістю при різному вмісті вологи і під дією негативних температур; стисненням і здатністю до ущільнення після розпушуванням. Якість і технічну придатність ґрунту визначають лабораторними дослідженнями. При порушеннях природної структури (наприклад, під час його копання) ґрунт збільшується в об'ємі. Це властивість називається розпушеністю і вимірюється у відсотках по відношенню до початкового об'єму.

Таблиця 1.1 - Приріст обсягів при розпушенні ґрунту

Ґрунт	Група ґрунту	Приріст обсягів при розпушуванні початкове (в%)	Приріст обсягів при розпушуванні залишкове (в%)
піщаний	I	8 - 17	1 - 2,5
торф рослинний	II	20 - 30	3 - 4
суглинний	III	14 - 28	1,5 - 5
глинистий	III	24 - 30	4 - 7
важкі глини	IV	26 - 32	6 - 9
мергелі	IV	33 - 37	11 - 15
кам'янистий	V	30 - 45	10 - 20
скелястий	VI	45 - 50	20 - 30



Таблиця 1.2 - Кути природного укосу, град.

Найменування ґрунту	Сухі ґрунти	Вологі ґрунти	Мокрі ґрунти
рослинна земля	40	35	25
пісок крупний	30 - 35	32 - 40	25 - 27
пісок дрібний	25 - 30	35	15 - 20
суглинок	40 - 50	35 - 40	25 - 30
глина жирна	40 - 45	35	15 - 20
гравій	35 - 40	35	30
торф	40	25	15

Таблиця 1.3 - Класифікація ґрунтів за складністю їх розробки

Найменування і характеристика ґрунту	Група ґрунту	Середня щільність, кг / см ²
Галька і гравій розміром до 80 мм	I	1700 - 1800
Галька і гравій розміром більше 80 мм з домішкою Булига	II	1900
гіпс м'який	IV	2200
Глина жирна м'яка або насипна, злежалі з домішкою щебеню чи гравію до 10%	II	1800
то ж, з домішкою щебеню, гравію або Булига більш 10%	III	1950
Глина морена з домішкою до 30% валунів	IV	1950
глина сланцева	IV	---
глина тверда	IV	2000
Глина важка ломова	III	1900
Ґрунт рослинного шару без коренів і з корінням	I	1200
Ґрунт рослинного шару з домішкою гравію, щебеню або будівельного сміття	II	1400
Лес природної вологості пухкий з домішкою гравію і гальки	I	1600 - 1800
лес отверділий	IV	1800
Крейда м'яка	IV	1550
Мерзлі ґрунти піщані, попередньо розпушений	II	---
Мерзлі ґрунти глинисті і суглинні	V	---



Продовження табл. 1.3.

Морені з валунами	IV	2100
Опоки	IV	1900
Пісок всіх видів, в тому числі з домішкою щебеню, гравію або гальки	I	1600 - 1700
Скельні ґрунти попередньо розпушений	VI	1800
Скельні ґрунти не потребують розпушення	IV	1550
Солончак і солонец м'які	I	1600
Солончак і солонец затверділі	III	1800
Суглинок легкий і лесовидний	I	1700
Суглинок з домішкою гравію, щебеню, Булига або будівельного сміття	II	1750 - 1950
Супісок всіх видів, в тому числі з домішкою гравію, щебеню або будівельного сміття	I	1600 - 1900
Будівельне сміття пухке і злежане	II	---
Будівельне сміття зцементоване	III	1800
Торф без коренів і з корінням товщиною до 30 мм	I	600
Торф з корінням товщиною понад 30 мм	II	600
трепел слабкий	IV	1500
Чорнозем і каштанові ґрунти природної вологості	I	1300
Чорнозем і каштанові ґрунти затверділі	II	1200
Щебінь всякий, а також з домішкою Булига	II	1750 - 1950
шлак котельний	I	750
Шлак металургійний, що вивітрився	II	---
Шлак металургійний, що невивітрився	III	1800



Таблиця 1.4 - Технічні характеристики роторних екскаваторів

Найменування параметру	Значення параметрів моделі								
	EP-800г	EP-1500	EP-3000	EP-3500М	EPШР-4500/21	EPШР-4500/25	EPШР-4500/30	EPШР-5250	EPШР-7000
Теоретична продуктивність, м ³ / год	800	1500	3000	3500	4500	4500	4500	5250	7000
Висота копання, м	12-13	16-17	20	23	21	25	30	33	37
Глибина копання, м	0,5	1,7	2,0	1,8	2,0	3,0	3,0	2,6	3,0
Діаметр ротора, м	5	6,8	8,6	10,6	11	12,5	12,5	16,5	16,5
Число ковшів ротора, шт	20	12	16	16	16	16	16	16	16
Ширина стрічки транспортеру, м	1,2	1,2	1,6	1,8	1,8	1,8	1,8	2,0	2,0
Швидкість руху стрічки, м/с	3,3	4,3	3,5	4,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5



Продовження табл. 1.4.

Швидкість пересування машини, м / ч	450	480	540	480	120	120	120	120	120
Ухил робочої площадки, град: - при роботі - транспортний	3	3	3	3	1:20	1:20	1:20	1:20	1:20
	5-7	5	5	5	1:10	1:10	1:10	1:10	1:10
Тиск на ґрунт, кг / см ²	1,3	1,2	1,2	1,25	1,08	1,09	1,12	1,4	1,5
Підводиться напруга, кВ	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Потужність приводу ротора, кВт	320	320	800	800	1000	1000	1000	2x500	2x630
Маса екскаватора, т	380	710	1140	1 280	1470	2020	2270	3760	4370

1.2. Характеристики, сучасний стан і перспективи розвитку конструкцій компактних роторних екскаваторів

Громіздкість роторних екскаваторів, виконаних за звичайними схемами для роботи в забоях великих розмірів, заважають використанню їх в будівництві, де вирішальним фактором є продуктивність машини при зниженні ваги. Відповідно до цього з'явилися моделі, виконані за звичайними врівноваженими схемами, але зі зменшеними розмірами. Таке рішення не могло дати значного ефекту, так як зберігало майже незмінними габарити екскаватора, тим більше, що частина противаги роторної стріли залишалася на стрілі противаги, і повністю зберігалося верхня конструкція противаги конвеєра. Перенесення всього противаги роторної стріли на платформу з'явився подальшим удосконаленням, але тільки відмова від врівноваження конвеєра привів до



усунення складної металоконструкції надбудови,

Використання методів блочного конструювання забезпечило можливість розбирання машини на вузли для транспортування. Це, в свою чергу зробило транспортабельні машини вагою 150 - 200 т, так як вага найважчого вузла у них не перевищує 18 - 20% ваги машини, тобто 40 т.

Невеликі робочі розміри кар'єрних машин дозволяють підвищувати окружне зусилля на роторі і реалізоване питоме зусилля копання при відносно невеликому збільшенні ваги, пропорційному приблизно кореню квадратному з збільшення питомої зусилля копання - k_1 . Це відбувається внаслідок того, що збільшення k_1 для даної машини неминуче супроводжується деяким зменшенням діаметра ротора. Зміна діаметру ротора D_r в процентах підпорядковується при цьому залежністю, близькою до величини:

$$D_2 = D_1 \sqrt[3]{k_1/k_2}, \quad (1.1)$$

Де нові значення діаметра ротора і питомої зусилля копання мають індекс - «2».

Мінімальна довжина роторної стріли кар'єрного компактного екскаватора визначається можливістю роботи ротора при стрілі, розташованій над кутовою частиною гусениць без небезпеки зачепити за неї ротором, і при необхідному заглибленні ротора нижче рівня стоянки екскаватора на 0,2 – 0,8 м або $(0,06 \div 0,08)D_r$. Для збільшення висоти копання доцільно шарнір п'яти стріли зміщувати назад за вісь обертання екскаватора на відстань $e \approx 0,145 \sqrt[3]{G}$ м, де G - вага екскаватора в т.

Зсув шарніру п'яти за вісь обертання дозволяє збільшити висоту і глибину копання, зменшити зусилля в гідроциліндре підйому стріли і полегшити розміщення пристрою для передачі ґрунту на розвантажувальний конвеєр.

З умов можливості розміщення на платформі приймальні частини поворотного конвеєра висота шарніра п'яти стріли складе:

$$h_{m.c} = 1,06 \sqrt[3]{G}, \text{ м} \quad (1.2)$$

Досвід показав, що задовільні результати виходять при виборі діаметра



ротора D_p і довжини роторної стріли l_c з урахуванням вище наведених зазначених умов (1.1), (1.2), близьких відповідно (для ґрунтів з $k_1 \approx 3 \div 4$ кг / см²).

$$D_p = 1,13\sqrt[3]{G} \quad \text{і} \quad l_c \approx 1,78\sqrt[3]{G} ; \quad (1.3)$$

для ґрунтів з $k_1 \geq 7$ кг / см² (7 МПа) краще

$$D_p = \frac{1}{0,505} \sqrt[3]{G/k} \quad (1.4)$$

Тоді максимальний радіус копання від осі обертання платформи:

$$R_{\max} = l_c + \frac{D_p}{2} - e \approx 2,2\sqrt[3]{G} \quad (1.5)$$

а найбільша висота копання при вугіллі підйому стріли, а й висоті різку $0,7D_p$:

$$H_k = h_{m.c} + l_c \sin a + 0,2 D_p \quad (1.6)$$

при $a = 180^\circ$ $H_k \approx 1,83\sqrt[3]{G}$;

Для попередніх розрахунків значення необхідного окружного зусилля ротора може бути прийнято (при $15 > D_p > 3$):

$$P_k = 3,7 k_1 \frac{D_p^{-1,7}}{15} m \quad ; \quad (1.7)$$

Окружна швидкість безкамерного ротора може бути прийнята:

$$v_p = (0,9 \div 1,32) \sqrt{D_p} \quad \text{м / сек.} \quad (1.8)$$

межі v_p відповідають використанню (в залежності від разгружаємості ґрунтів) від 40 до 60% критичної швидкості, при якій сили тяжіння ґрунту врівноважуються відцентровими силами [1]. При цьому D_p , кількості ковшів n_k і продуктивності при роботі в розпушеному ґрунті P_T необхідна потужність приводу ротора наближено може бути підрахована за формулою:

$$N_{p=P_k v_p / 102 \cdot 0,85 + P_T \gamma D_p / 740} \quad \text{кВ} \quad \text{т,} \quad (1.9)$$

де $P_T = 60n_p q$; n - число разгрузок породи в хвилину;

$$n_p = 19,1 v_p n_k / D_p \quad (1.10)$$

γ - об'ємна вага розпушеного ґрунту в т / м³.



Роторні екскаватори малих лінійних параметрів мають: - нижнє розташування противаги (під машинним відділенням поворотної платформи); - гідроциліндри підйому (опускання) роторної стріли; - співвісний розташування роторної стріли і розвантажувальної консолі, неврівноважена розвантажувальна консоль, а так же, комбінований привід механізмів (електрогідравлічний і дизель гідравлічний). Завдяки малим лінійним параметрами, ці екскаватори відрізняються високою жорсткістю системи «ротор - стріла - платформа» і можуть розвивати відносно високі питомі зусилля копання ($0,2 \text{ МПа} < K_F < 0,35 \text{ МПа}$) що розширює сферу їх застосування.

Машини з малими лінійними параметрами характеризуються невеликою кількістю моделей в порівнянні з кар'єрними роторними екскаваторами, причому кожна з фірм-виробників прагне типізувати компоновальні схеми і звести їх до однієї, двох або трьох моделей.

Якщо перші роторні екскаватори з малими лінійними параметрами призначалися для виконання земляних і навантажувальних робіт великого об'єму, то в середині минулого століття все ширше стали застосовувати для відкритих гірських робіт (переважно на кар'єрах будматеріалів, де потужність розкриття і корисної копалини порівняно невелика). Для зменшення кількості транспортних горизонтів при значних висотах уступів і скорочення числа пересувів транспортних комунікацій екскаватори працюють в комплексі з одним або декількома перевантажувачами.

Роторні екскаватори з малими лінійними параметрами повинні відповідати таким основним технологічним:

- можливість використання як на вантаженні, так і на розробці порід;
- пристосованість до роботи з конвеєрним, автомобільним і залізничним транспортом;
- досить високу маневреність, мобільність і транспортабельність. Якщо габарити і вага машини не допускають перевезення її в зібраному вигляді, то конструкцією повинна передбачатися розбирання її на окремі транспортабельні частини;



- пристосованість для цілодобової роботи;
- простота і легкість обслуговування;
- невелика кількість обслуговуючого персоналу (не більше двох осіб), і

конструктивним вимогам:

- можливість оснащення автономним приводом;
- висока надійність конструкції;
- мінімальні габарити і вага при заданій продуктивності.

Всі виготовлені до теперішнього часу роторні екскаватори з малими лінійними параметрами на двох гусеничному ходу є повноповоротними.

У другій половині століття ХХ століття найбільшим виробником роторних екскаваторів з малими лінійними параметрами була фірма «Демаг - Лаухгаммер» (ФРН). Фірма мала філіями по монтажу та наладки машин в ряді країн (наприклад, в США, функції філії виконувала фірма «Мак - Доуелман інжиніринг компанії»). Перша машина цієї фірми, з малими лінійними параметрами SchRs 150 була виготовлена в 1956-1957 рр. Характерними особливостями цього екскаватора були гідропривід ротора і механізмів повороту роторної і розвантажувальної стріл, підйом і опускання обох стріл гідроциліндрами, застосування електричних барабан - моторів для приводу конвеєрів. Гідронасоси наводилися через редуктор електродвигуном. Кожна з гусениць мала індивідуальний електропривод. Електроенергія до екскаватора від мережі підводилася гнучким кабелем.

У 1962 р на гравійному кар'єрі при будівництві греблі в Оровіллль (США) був введений в експлуатацію екскаватор SchRs 1400 \ 0,5 9,5, розроблений і частково виготовлений об'єднанням «Демаг-Лаухгаммер» (частина вузлів і монтаж машини за ліцензією виконала фірма «Мак - Доуеля - Уелман інжиніринг компанії») [2].

У 1964 р фірмою випущений екскаватор для вантажно-розвантажувальних робіт на вугільних і рудних складах SchRs 760 \ 0,5 20, принципова компоновка, якого на відміну від інших машин цієї фірми (див. Рис. 1.1) виконана за схемою, представленої на рис. 1.2.

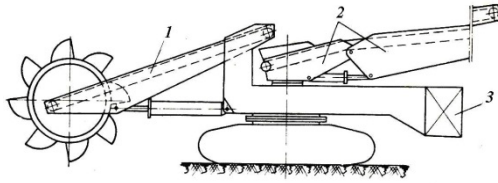


Рисунок 1.1 – Схема розміщення основного обладнання на частково урівноваженому екскаваторі: 1 - роторна стріла; 2 - противагу роторної стріли; 3 - розвантажувальна стріла.

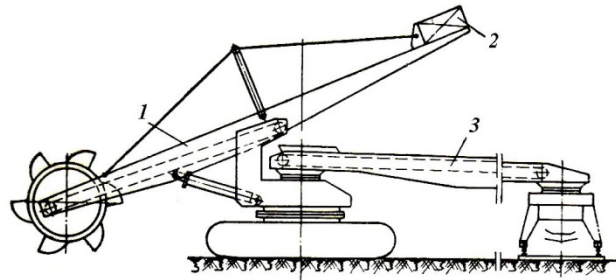


Рисунок 1.2 –Коромислового конструкція роторного стріли, розвантажувальний пристрій у вигляді сполучного мосту. (1 - роторна стріла; 2 - противагу; 3 - з'єднувальний міст.)

Фірма ЛМГ виготовляє роторні екскаватори з малими лінійними параметрами з 1957 р

У номенклатурі фірми - екскаватори з ковшами ємністю 25; 50; 70 і 150 л і теоретичною продуктивністю від 186 до 720 м³ / год. Всі машини повністю врівноважені, компоновка їх однотипна.

На всіх машинах фірми застосовувалися електропривод.

Екскаватори SchRs 25 \ 0,35 6; SchRs 50 \ 0,35 6,3; SchRs 70 \ 0,5 6,5 і SchRs 150 \ 0,5 10,5 випускалися для живлення від мережі через гнучкий кабель або з власної дизель-генераторної установкою.

Вага дизель-генераторної установки більше ваги електричного приймально-розподільного пристрою, тому для збереження ваги машини в обох виконаннях конструктивно однаковим, дизель-генераторна установка розміщувалася в задній частині поворотної платформи, що дозволяло зменшити вагу баласту противаги.

На всіх екскаваторах фірми ЛМГ механізм підйому роторної стріли гідравлічний, а розвантажувальної стріли-канатний.

Останньою розробкою фірми є компактний роторний екскаватор Demag HD800 (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Роторний екскаватор Demag HD800. В даний час екскаватор використовується компанією NRG Energy на вугільній шахті в Техасі.



Рисунок 1.4 – Екскаватор SchRs 175 / 0,510 фірми «Букау-Вольф»

Фірма «Букау-Вольф» також випускала роторні екскаватори з малими лінійними параметрами. На рис. 1.4 показаний випущений фірмою в 1964 р екскаватор SchRs 175 \ 0,5 10 продуктивністю 475-630 м³/ч, що працює на кар'єрі «Обоурн» (Бельгія).

Всі приводи екскаватора електричні, живлення від мережі або від власної дизель-генераторної установки. На нижній рамі екскаватора між гусеничними візками змонтований кабельний барабан. Механізм підйому і опускання роторної стріли - виконаний гідравлічним, а розвантажувальної консолі - канатним.

Особливістю конструкції виконавчого органу було установка між ковшами додаткових ріжучих поясів, що зменшує розміри відокремлюється від масиву матеріалу. Тип, кількість і розстановка зубів на них такі ж, як і на ковшах.

Народним підприємством «Лаухгаммерверк» (НДР) в даний час «ТАКРАФ», з 1965 р випускається конструкція екскаватора SRs 130 9 \ 0,5 продуктивністю 320-500 м³ / год.

Компонування екскаватора виконана за схемою (див. Рис. 1.1), всі приводи - електричні, живлення - від мережі через гнучкий кабель.

Конвеєри роторної та розвантажувальної стріл наводяться барабан -Мотор.

Механізми підймання та опускання роторної і розвантажувальної стріл - гідравлічні.



Залежно від бажання споживача, екскаватор поставлявся в одній з двох модифікацій: продуктивністю 320 м³ / год і питомою зусиллям копання $K_1 = 36$ кг/см або продуктивністю 500 м³ / год і питомою зусиллям копання $K_1 = 22$ кг/см.

В останні роки фірмою був розроблений компактний роторний екскаватор SRs (H) 1050 (рис. 1.5).

Верхня конструкція екскаватора може регулюватися горизонтально. Це дозволяє йому працювати в блоковому режимі на уступах з поздовжнім нахилом до 11% при одночасному селективному видобутку тонких вугільних пластів або сепарування міжпластових порід. SRs (H) 1050 є найбільшим в світі горизонтованим компактним екскаватором.



Рисунок 1.5 – Роторний екскаватор SRs (H) 1050



Рисунок 1.6 – Екскаватор SRs (H) 1050 на роботі в кар'єрі

Фірма *Ихи (Японія)* в початку 1965 р випустила роторний екскаватор продуктивністю 100 м³/год, привід автономний - дизель - електрогідравлічний.

Приводи ротора, механізмів повороту і пересування екскаватора виконані гідравлічними, роторна та розвантажувальна стріли піднімаються і опускаються гідроциліндрами. Гідроприводи ротора і механізму повороту дозволяють змінювати швидкості різання і повороту в широких межах. Робоче місце машиніста не обладнане кабіною, що не виправдано за умовами техніки безпеки і гігієни праці.

Фірма «*Мак-Доуеля-Уелман інжиніринг компанії*» є ліцензії власником об'єднання «*Демаг-Лаухгаммер*» в США і Канаді. З 1964 р вона випускала



роторний екскаватор продуктивністю 1 400 м³/год при робочій вазі 100 т, привід дизель - електрогідравлічний. Такі машини використовувалися на будівництві залізниці Балтімора-Огайо і для поглиблення пересохлого русла річки в Західному Клівленді.

Ротор приводиться двома гідродвигунами, кожна з гусениць оснащена індивідуальним гідроприводом.

Піднімаються й опускаються роторна і розвантажувальна стріли гідроциліндрами. Машина поставляється укрупненими вузлами (роторна, розвантажувальна стріли, кабіна управління, поворотна платформа в зборі з рамою ходової частини, гусениці, дизель-генераторна установка, противага) і монтується за 8 год. При виїмці шаруватих сланців середньої міцності технічна продуктивність машини склала 1000 т / ч, але може бути доведена до 1600 т / год [3].

Фірма «Стречен енд Хеншоу лімітед» (Англія) спільно з фірмою «Везерхютте Отто Вольф» (ФРН) в 1965 р освоїла серію роторних екскаваторів з малими лінійними параметрами, яка складається з чотирьох моделей продуктивністю від 150 до 1200 м³/год.

Всі приводи екскаваторів - електричні, живлення - від мережі або від власної дизель-генераторної установки, яка встановлюється на будь-яку з моделей за бажанням замовника. Механізми підймання та опускання роторної і розвантажувальної стріл - гідравлічні.

Невеликі розміри робочого обладнання роторних екскаваторів з малими лінійними параметрами при розробці міцних порід і вугілля дозволяють забезпечити стабілізацію діючих навантажень завдяки створенню необхідної жорсткості системи ротор-стріла-підвіска-поворотна платформа при значно меншому відносному зростанні ваги, ніж у кар'єрних роторних екскаваторів.

Виробництво кар'єрних компактних роторних екскаваторів в СРСР було розпочато в кінці 50-х років і в даний час здійснюється в країнах СНД тільки на заводах України - Донецьким (ДМЗ), ВАТ «Азовмаш» і Новокраматорським (НКМЗ).



В СРСР роботи, спрямовані на створення гідрофіційованих роторних екскаваторів, перебували на стадіях дослідно-промислових розробок. Ініціатором цього напрямку виступав ІГД ім А. А. Скочинського, яким в 1972-1973 рр. проведені промислові випробування дослідного зразка гідроприводу ротора на екскаваторі РЕ-2М в умовах Екібастузського родовища. В якості двигуна використовувався високо моментний радіально-поршневий гідромотор МР-16 потужністю 200 кВт. Насос, встановлений на поворотній платформі, створював робочий тиск до 160 кгс/см² (16 МПа).

Технічні характеристики компактних роторних екскаваторів, виготовлених в Україні, наведені в табл. 1.5. Одним з них, є екскаватор ЕР-3500 призначений для відпрацювання слабостійких піщано-глинистих розкривних порід з питомим опором копання до 160 кг / см² в південних кліматичних зонах з діапазоном температур -250 до +350 [4].

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики роторних екскаваторів виготовлених в Україні.

параметри	ДМЗ	НКМЗ	
	ЕРГВ-630ц	ЕР-1500	ЕР-3500М
Теоретична продуктивність, м ³ /год	630	1500	3500
Висота копання, м	9	16-17	23
Глибина копання, м	0,5	1,7	1,8
Діаметр ротора, м	3,2	6,8	10,6
Число ковшів ротора, шт	8	12	16
Ширина стрічки транспортеру, м	1,0	1,2	1,8
Швидкість стрічки, м / с	4	4,3	4,0
Швидкість ходу, м / год	355	480	480
Тиск на ґрунт, кг / см ²	0,126	1,2	1,25
Потужність приводу ротора, кВт	300	320	800
Маса екскаватора, т	730	710	1 280



Фірма «Андерсон Мейвор Лімітед» (Раніше називалася «Мейвор енд Кулсон», Шотландія) з 1967 р випускав універсальний гідравлічний екскаватор Е-10 на пневмоколісному ході. У 1970 р була створена модифікація з гусеничним рушієм. Дизель-гідравлічний привід додає машині повну автономність. Найбільш придатними дизелями англійського виробництва для цієї машини був Лейманд ІЕ690 потужністю 200л. С. при 2000 об / хв, Роллс-ройс SV 65СТ потужністю 190 л. С. при 1800 об / хв і 250 потужністю 189 л. с. при 2000 об / хв. На вимогу замовника машина могла бути оснащена і іншими дизелями виробництва різних країн. Тиск в гідросистемі - 140 кгс / см² необхідна для приводу гідронасоса потужністю 112 кВт (150 л. С.). Потужність гідромотора ротора дорівнює 32,8 кВт, конвеєра стріла ротора - 20 кВт, конвеєра розвантажувальної консолі - 11,9 кВт, механізму повороту верхньої будови - 10 кВт, механізму повороту розвантажувальної консолі - 5,2 кВт. Масляний бак зварної конструкції ємністю 318 л. оснащений показчиком рівня і знімним відстійником. Масло до насоса і фільтрів надходило самопливом. Масло в гідравлічній системі охолоджується за допомогою маслоохолоджувача, обдуваного повітряним потоком, який створювався вентилятором. Маслоохолоджувачем є теплообмінник із зустрічною циркуляцією води (25 л) і (2,8 л) масла.

Для розвантаження пневмошин при екскавації служили чотири аутригера з гідравлічним механізмом підйому, які автоматично піднімалися при включенні механізму пересування. При роботі з конвеєрним транспортом для збільшення ширини заходки застосовується причіпна візок, уздовж якої конвеєр пересувався за допомогою гідроциліндрів. У моделі Е-10 застосовувалася ще одна оригінальна конструктивна новинка: при переміщенні екскаватора на значні відстані хвостова секція розвантажувальної консолі опускалася і приймала вертикальне положення. Електрообладнання екскаватора автотракторного типу, розраховане на напругу 24 В.

Фірма «KRUPP» випускає роторні екскаватори більше 70 років. Розробка гірських порід за допомогою компактних роторних екскаваторів - надзвичайно



ефективне рішення з економічних і екологічних факторів. Ці машини дозволяють розробляти породи з міцністю на стиск 10 МПа, а в окремих випадках до 20 МПа.

В даний час фірмою «KRUPP» виготовляються компактні роторні екскаватори в стандартному виконанні, що дозволяє забезпечити достатню простоту технічного обслуговування і при необхідності, ремонту за рахунок використання в їх конструкції стандартних елементів машин серійного виробництва. Для важких умов експлуатації на кар'єрах або великих будівельних майданчиках застосування зазначених стандартних вузлів дозволяє швидко провести ремонт або техобслуговування, а широке використання агрегатного складання - значно скоротити терміни поставки екскаваторів. З 500 випущених за останні три десятиліття машин близько 100 були виготовлені як стандартні.

Фірма «KRUPP» пропонує широку гаму компактних роторних екскаваторів від S100 до S1600 продуктивністю від 450 до 6600 м³ / ч.

Ми розглянемо чотири типи роторних екскаваторів фірми «KRUPP». Значення технологічних параметрів для розглянутих типорозмірів роторних екскаваторів фірми «KRUPP» дано в табл. 1.6.

Характерними конструктивними особливостями екскаваторів фірми «KRUPP» є: наявність автоматичної централізованої системи змащення, гідравлічний привід ходових візків, поворотних і підйомних пристроїв; енергопостачання як безпосередньо від електромережі, так і від дизельного двигуна. При постачанні електроенергії для приводу обох стрічкових конвеєрів і ротора використовуються електродвигуни, а при енергопостачанні від дизельного двигуна привід всіх елементів - гідравлічний.

Компанія «Sandvik Mining and Construction» успішно завершила складання першого компактного роторного екскаватора з самохідним перевантажувачем для «Matra Kraftwerk G.AG» (Угорщина) в 2009 р.



Таблиця 1.6 - Значення технологічних параметрів і технічна характеристика компактних екскаваторів Фірма «KRUPP».

Розміри	S100	S250	S400	S630
1	2	3	4	5
Висота вибою, А, (м)	6	9	11	15
Ширина заходки, В, (м)	8	12	15	20
Глибина стружки, С, (м)	2,0	3,5	4,0	4,5
Кут укосу торця забою, α_1 , (град)	60	60	60	60
Кут укосу формується укосу, α_2 , (град)	66	64	62	60
Місткість ковша, (л)	100	250	400	630
Ширина стрічки, (м)	0,80	1,00	1,20	1,40
Теоретична продуктивність, (м ³ / год)	500	1250	2000	3000
Ефективна продуктивність, (м ³ / год)	200	550	900	1400
Робоча вага екскаватора, (т)	55	140	200	400

Збірка екскаватора була почата в 2008 р в листопаді після того, як всі основні вузли були сконструйовані і ретельно опрацьовані. Згідно з розкладом, збірку машини повинні були завершити через вісім місяців. При цьому на майданчику кожен день працювали близько 130 збирачів.



Рисунок 1.7 – Компактний роторний екскаватор компанії «Sandvik Mining and Construction» на випробуваннях.



Перші випробування на відкритому руднику біля м Буккабрани пройшли за розкладом, в кінці червня 2009 р і були введені в експлуатацію вже у вересні. Новий екскаватор дозволив збільшити продуктивність видобутку бурого вугілля на копальні р Буккабрани.

Новий роторний екскаватор важить близько 1650 т, довжина стріли ротора становить 28 м (92 футів), а діаметр роторного колеса дорівнює 12 м (40 футів). Потужність приводу ротора з 16-ма ковшами складає близько 1100 кВт – сумарна ж потужність машини досягає 3200 кВт. Екскаватор разом з перевантажувачем володіють продуктивністю 6700 м³/рік або 12 млн. м³/рік.

1.3. Мета і задачі дослідження

Об'єкт досліджень – перетворення енергії у електроприводі з асинхронними двигунами.

Предмет досліджень – статичні і динамічні характеристики електроприводу роторного колеса роторного екскаватора ЕРШР-1600 по системі перетворювач частоти - асинхронний двигун.

Метою роботи є синтез системи стабілізації частоти обертання роторного колеса, що забезпечить зменшення динамічних навантажень на конструкції роторної стріли екскаватора та підвищення видобутку сировини.

Задачі дослідження.

- аналіз технологічного процесу, умов і фізикомеханічних властивостей процесу різання породи;
- розрахунок параметрів заступної схеми електроприводу за системою «перетворювач частоти – асинхронний двигун»;
- розрахунок і аналіз статичних характеристик;
- синтез системи підпорядкованого керування з ПІ-регулятором струму та ПІ-регулятором швидкості для забезпечення стабілізацію кутової швидкості і зниження статизму;



- аналіз економічної ефективності впровадження частотно-регульованого електроприводу.



КАРТЕЛ 2 / CHAPTER 2 ІННОВАЦІЙНО-ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

2.1. Аналіз кінематики і навантажень роторного екскаватора

Аналіз кінематики і навантажень основних механізмів, що забезпечують робочий процес роторного екскаватора, дозволяє пояснити розрахункові співвідношення для оцінок середніх і максимальних статичних моментів, що визначають вибір потужності електроприводів, скласти розрахункові схеми, що полегшують побудову розрахункових статичних і динамічних моделей, виробити рекомендації по типу застосовуваного електроприводу, в залежно від характеру і діапазону зміни навантажень, необхідних діапазонів зміни швидкості.

Для аналізу середніх статичних зусиль, що діють на робочий орган роторного екскаватора, розглянемо кінематичні і силові співвідношення, що характеризують процес копання.

Ріжучі кромки ковшів беруть участь одночасно в двох обертальних рухах - щодо осі роторного колеса і осі обертання поворотної частини екскаватора. При цьому вони описують в просторі траєкторію, що лежить на тороїде обертання; в частині цієї траєкторії відбувається контакт з розроблюваною породою.

Складові миттєвої швидкості кромки ковша, що знаходиться на осі стріли, показані на рис. 2.1. Співвідношення зазначених складових встановлюється в межах

$$\operatorname{tg} \xi = v_s / v_p = 0,3 \div 0,15,$$

де v_p - лінійна швидкість різання; v_s - лінійна швидкість повороту по кромці (швидкість екскавації).

Ширина стружки h_0 залежить від ξ і відстані між ковшами a і дорівнює:

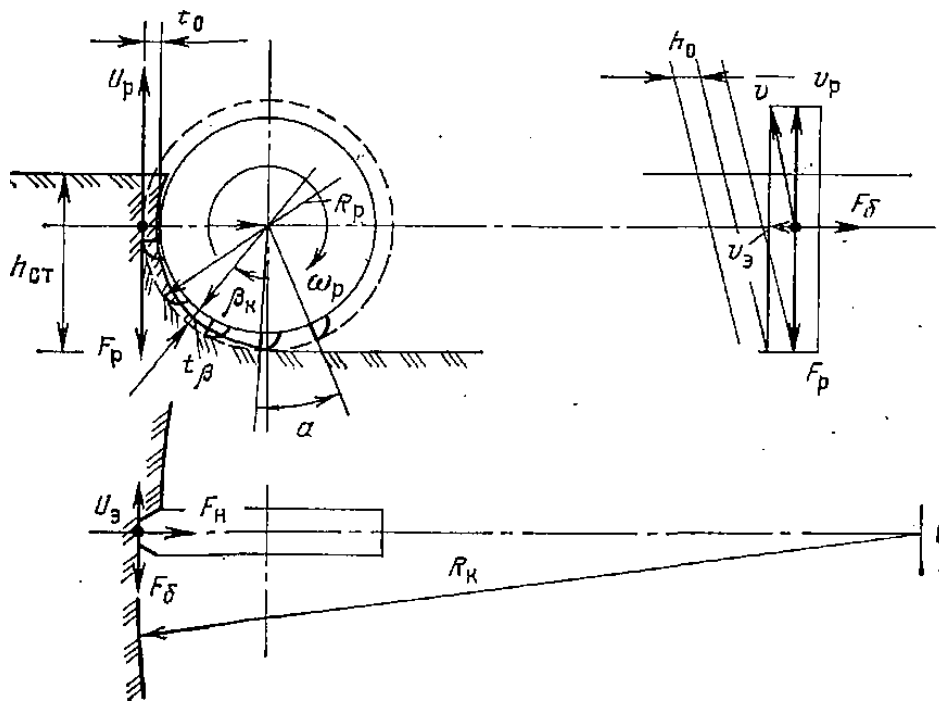


Рисунок 2.1 – Схема швидкостей і зусиль, що діють на крайку ковша роторного колеса при копанні

Миттєва товщина зрізу породи даними ковшем t_β залежить від його кутового положення β_k і описується зразковим співвідношенням

$$t_\beta \approx t(\beta_k) = t_0 \sin \beta_k.$$

параметри стружки t_0 і h_0 пов'язані для заданих значень ємності ковша E , теоретичної продуктивності Q_T і відносини $\varepsilon_0 = t_0/h_0$ (зазвичай 1,2-2,8) формулою

$$t_0 = \sqrt{\frac{E\varepsilon_0}{k_p h_c}} = \sqrt{\frac{Q_T \varepsilon_0}{60 k_p n_z}}$$

де k_p - коефіцієнт розпушення ґрунту; h_c - висота шару уступу;

n_z - число разгрузок ковшів в 1 хв.

Як реакція на зусилля, пов'язані з відділенням породи від масиву, на кромці ковшів виникають складові сумарної «сили опору копання F_δ , F_p і F_H , показані на рис. 2.1.

сила F_H спрямована уздовж осі стріли (нормально до площини -зрізу), сприймається підшипниками роторного колеса і передається на опорну конструкцію. Сила F_δ (Бічна) перпендикулярна площині роторного колеса і



сприймається приводом повороту. Сила F_p визначає середню складову статичної навантаження приводу роторного колеса.

Сила копання F_p значною мірою залежить від категорії ґрунту, що визначає коефіцієнт питомої сопроотивлення копання, через який може бути виражено у вигляді

$$F_p = k_f S_\Sigma, \quad (2.2)$$

– де k_f - коефіцієнт питомої опору копання; S_Σ - сумарна площа поперечного перерізу стружки, зрізаних усіма ковшами.

Оскільки механізм роторного колеса в Першу чергу визначає продуктивність екскаватора, доцільно розглянути вираз потужності, потрібної власне для копання і рівною $P_p = F_p V_p$, через теоретичну продуктивність Q_T екскаватора по пухкої маси як головний технічний показник машини. Необхідна швидкість різання при даній Q_T і S_Σ визначається простим виразом

$$v_p = Q_T / (3600 k_p S_\Sigma), \quad (2.3)$$

де Q_T - продуктивність, м³/год.

Отже, потужність, необхідна при даних значеннях k_f і k_p для забезпечення Q_T з урахуванням останніх співвідношень, дорівнює:

$$P_p = F_p v_p = Q_T k_f / k_p, \quad (2.4)$$

а момент статичного навантаження щодо осі роторного колеса, пов'язаний з різанням,

$$M_p = \frac{P_p}{\omega_p} = Q_T \frac{k_f}{k_p} \frac{1}{\omega_p}. \quad (2.5)$$

З урахуванням (2.2) момент M_p можна представити у вигляді

$$M_p = F_p R_{p,\kappa} = k_f S_\Sigma R_{p,\kappa},$$

де $R_{p,\kappa}$ - радіус роторного колеса по крайках ковшів.

Крім складової, яка визначається різанням, істотний внесок в навантаження приводу ротора вносить робота з подолання сили тяжіння при підйомі породи після її відділення від масиву. Неважко встановити, що при даній



продуктивності QT потужність, необхідна для здійснення зазначеної роботи, визначається співвідношенням

$$P_{II} = \frac{\gamma h_{cm}}{k_p} \tag{2.5}$$

де γ - щільність породи; h_{cm} - висота вертикальної стружки.

Відповідно складова моменту статичного навантаження, пов'язана з підйомом породи, дорівнює:

$$M_{II} = \frac{P_{II}}{\omega_p} = Q_T \frac{\gamma h_{cm}}{k_p \omega_p} \tag{2.7}$$

Додатковими факторами, що визначають навантаження приводу обертання роторного колеса, є витрати енергії, пов'язані з повідомленням відокремленою від масиву породи кінетичної енергії. Потужність, необхідна для здійснення цієї роботи, дорівнює:

$$P_K = \frac{v_p^2}{2}, \tag{2.8}$$

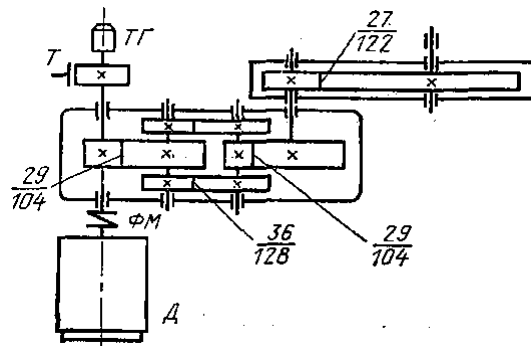


Рисунок 2.2 – Схема механізму приводу роторного колеса екскаватора ЕРШР -1600

де m - маса породи, зсипали ковшами за 1 с; v_p - швидкість породи при відділенні від ковша.

Частина навантаження визначається тертям ковшів про породу. Однак обидві останні складові навантаження на валу роторного колеса зазвичай не розраховуються, а враховуються коефіцієнтом $k_T \approx 1,03 \div 1,05$. Тому сумарна потужність на валу роторного колеса з урахуванням (2.5), (2.6) визначається



співвідношенням

$$P_{д,р} = \frac{P_{р\Sigma}}{\eta_p} = k_T Q_T \frac{(k_f + \gamma h_{cm})}{\eta_p k_p}; \quad (2.9)$$

Вираз (2.9) визначає середні теоретичні значення статичних навантажень. Миттєві зусилля на крайках ковшів і відповідно миттєві значення моментів на валу приводу роторного колеса визначаються і змінної складової навантажень, пов'язаної з неоднорідністю фізико-механічних властивостей породи, наявністю міцних включень, виникненням відколів, непостійністю числа одночасно ріжучих крайок, різним ступенем їх зносу і т. п.

Характеристики змінної складової навантаження погано піддаються аналітичному прогнозом і, як правило, вивчаються за результатами експериментальних досліджень. Треба відзначити, що урахування коливальної складової навантаження приводу ротора найбільш важливий при аналізі втомної міцності механічного обладнання екскаватора і в зв'язку з можливістю розвитку резонансних руйнівних навантажень. На величини, що визначають теплову завантаження двигунів, ці складові роблять менший вплив, так як в середньому періоди їх зраді лія багато менше постійних часу нагріву потужних приводних машин і практично не викликають коливання температури обмоток.

Передавальний механізм, що зв'язує вал роторного колеса з приводним двигуном, містить циліндричний редуктор. На рис. 2.2. приведена схема передавального механізму приводу ротора екскаватора ЕРШР-1600, що містить редуктор і відкриту зубчасту пару. Для запобігання перевантажень, кінематичного кола на швидкохідному валу безпосередньо після приводного двигуна D фрикційна муфта граничного моменту ΦM . На протилежному кінці цього валу передбачене колодокве гальмо T для фіксації роторного колеса в період стоянок і ремонтних робіт та тахогенератор $ТГ$.

Режим роботи електроприводу роторного колеса тривалий, при цьому розрахункові навантаження для визначення потужності і вибору двигуна з урахуванням (2.9) визначаються співвідношеннями



$$P_{Д,р} = \frac{P_{р\Sigma}}{\eta_p} = k_T Q_T \frac{(k_f + \gamma h_{cm})}{\eta_p k_p}; \quad (2.10)$$

$$M_{Д,р} = \frac{P_{Д,р}}{\omega_p} = \frac{P_{Д,р}}{\omega_p / i_p}. \quad (2.11)$$

Для аналізу складових статичного навантаження, що визначають сумарний момент опору щодо осі обертання поворотної частини, розглянемо схему, наведену на рис. 1.10.

Як вже показано вище, при кутовій подачі роторного колеса при копанні на крайках ковшів виникають зусилля, які мають складові, перпендикулярні осі стріли ротора. Сумарне зусилля, обумовлене цими складовими, представлено на рис.1 і 3 так званої бічної складової копання F_b , що створює відносно осі O момент

$$M_o = F_o R_k,$$

де R_k - радіус різання в горизонтальній площині, вимірюваний по кромці ковшів.

Радіус різання залежить від кута нахилу β_c стріли ротора по відношенню до горизонталі і змінюється в залежності від висоти відпрацьовується шару:

$$M_o = F_o R_k, \text{ де } R_o = R_k \text{ при горизонтальному положенні стріли.}$$

Таким чином, момент від бічної складової зусилля різання щодо осі обертання поворотної частини дорівнює:

$$M_o = F_o R_o \cos \beta_c. \quad (2.12)$$

Через різних площ конструкції машини, розташованих по різні боки щодо осі обертання поворотної частини, виникає момент, обумовлений вітровим напором f_B . При сталості вітрового напору по фронту ($f_B = \text{Const}$) максимальний момент від вітрового навантаження визначається сумарною дією моментів від елементів навітряної площі:

$$M_{B\max} = f_B \sum_{i=1}^n \Delta F_i r_i = M_F f_B, \quad (2.13)$$

де ΔF_i , r_i - відповідно елемент площі, його радіус щодо осі обертання, а M_F



- момент навітряної площі.

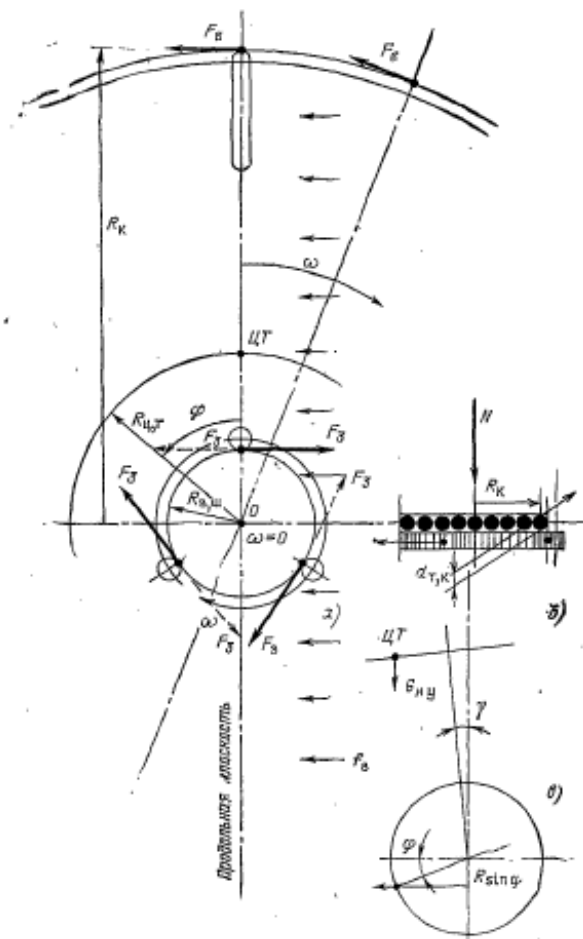


Рисунок 2.3 – Схема зусиль, що діють на механізм повороту роторного екскаватора

При відхиленні осі обертання від вертикалі на кут γ і повороті стріли відносно площини кута γ на кут φ (рис. 2.3, В) виникає момент від дії невірноважених сил тяжіння поворотної частини. Його значення, що видно з рис.3, В, визначається виразом

$$M_{ny} = G_{ny} R_{ЦТ} \sin \varphi \sin \gamma, \quad (2.14)$$

де $R_{ЦТ}$ - радіус додатки невірноваженою сили ваги.

Як впливає з (2.13) і (2.14), що становлять статичного навантаження механізму повороту МВ і m_{ny} залежать від кутового положення поворотної частини і носять активний характер.

Нормальним зусиллям на елементи кочення визначається момент опору



коченню. Наводячи ці моменти до осі обертання поворотної частини та враховуючи рис. 2.3,б, Отримуємо приведенний момент від сил тертя кочення

$$M_K = \frac{N}{j_{T,K}} \frac{R_k}{d_{T,K}} f_k, \quad (2.15)$$

де N – сила нормального тиску; f_k – коефіцієнт тертя кочення, m ; $j_{T,K}$ - кількість тіл кочення; R_k – радіус кочення; $d_{T,K}$ - діаметр тіл кочення.

При відхиленні осі обертання від вертикалі $N = G_\Sigma \text{ctg} \gamma$, де

G_Σ - сумарна вага поворотної частини з урахуванням породи.

З огляду на неминучу несиметрії прикладання навантаження і можливого прослизання тіл кочення розрахункове значення M_K коригується і приймається рівним:

$$M_K = M'_k f_{\text{ек}} f_{\text{пр}}, \quad (2.16)$$

де коефіцієнти $f_{\text{ек}}, f_{\text{пр}}$ враховують ексцентриситет прикладання навантаження і явище проковзування і приймаються рівними 1,1-1,25.

Таким чином, сумарне статичне навантаження щодо осі поворотної частини дорівнює:

$$M_{c,o} = M_{\bar{o}} + M_{B,o} + M_{k,o} + M_{ny}. \quad (2.16)$$

Дослідження, проведені на ряді діючих екскаваторів, показали, що сума моментів $M_{B,o} + M_{k,o} + M_{ny} \approx 0,5M_{\bar{o}}$, Тому для оціночних розрахунків можна приймати $M_{c,o} \approx 1,5M_{\bar{o}}$. Статичний момент навантаження M_Σ , *про* визначається активними моментами на вихідних валах редукторів приводів повороту, при цьому в зачепленні вінцевої і вихідної шестерень редуктора виникає зусилля (рис. 2,4)

$$F_\Sigma = M_{c,o} / (R_{B,III} j), \quad (2.17)$$

де j - число приводів механізму повороту; $R_{B,III}$ - радіус вінцевої шестерні.

Момент статичного опору, приведений до валу кожного двигуна приводу,



за умови рівномірного розподілу навантаження дорівнює:

$$M_{c,в} = \frac{M_{c,о} z_{вых,ш}}{i_p j \eta_p z_{в,ш}} \quad (2.18)$$

де $z_{вых,ш}$, $z_{в,ш}$ - число зубів вихідній і вінцевої шестерень;

i_p – передавальне відношення редуктора; η_p - ККД редуктора.

На рис. 2.4 показані один з циліндричних редукторів механізму повороту і частина вінцевої шестерні $BШ$, жорстко пов'язаної з нижньою рамою. Редуктори електроприводів повороту мають вертикальне виконання, причому вихідна шестерня $BxШ$, що знаходиться на вихідному валу, знімна.

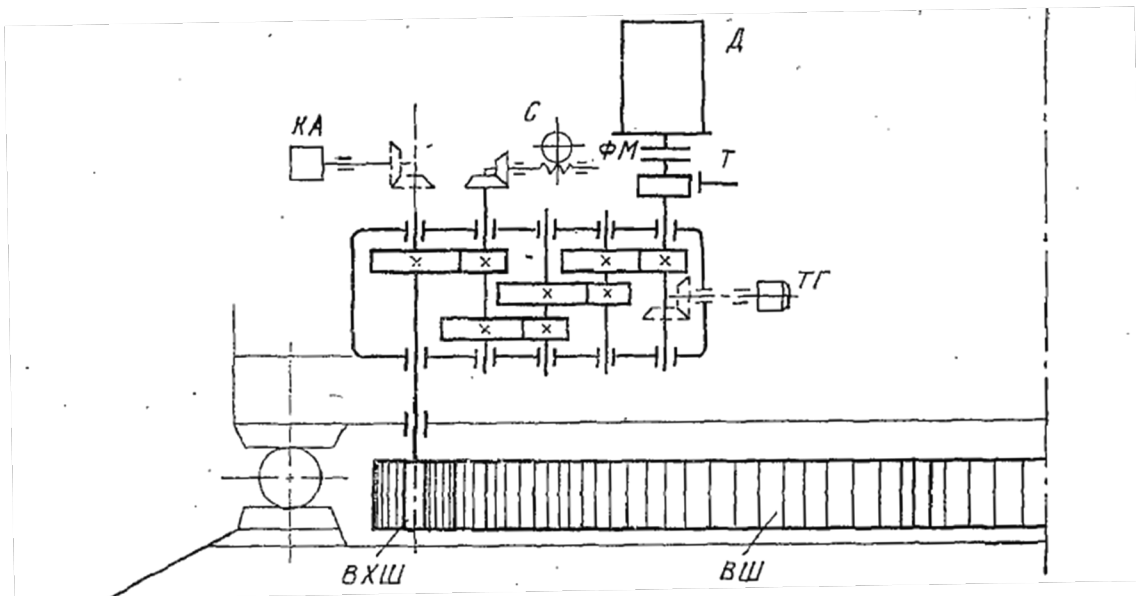


Рисунок 2.4 – Схема одного приводу механізму повороту екскаватора

На вхідному швидкохідному валу редуктора встановлюється фрикційна муфта граничного моменту ΦM , гальмівний шків і гальмо T . Від першого, четвертого і п'ятого вихідних валів за допомогою додаткових малопотужних передач виконуються висновки для приєднання тахогенератора $TГ$, сельсина $З$ і командоапарату $КА$, які використовуються для отримання сигналів зворотних зв'язків для системи керування електроприводом повороту.

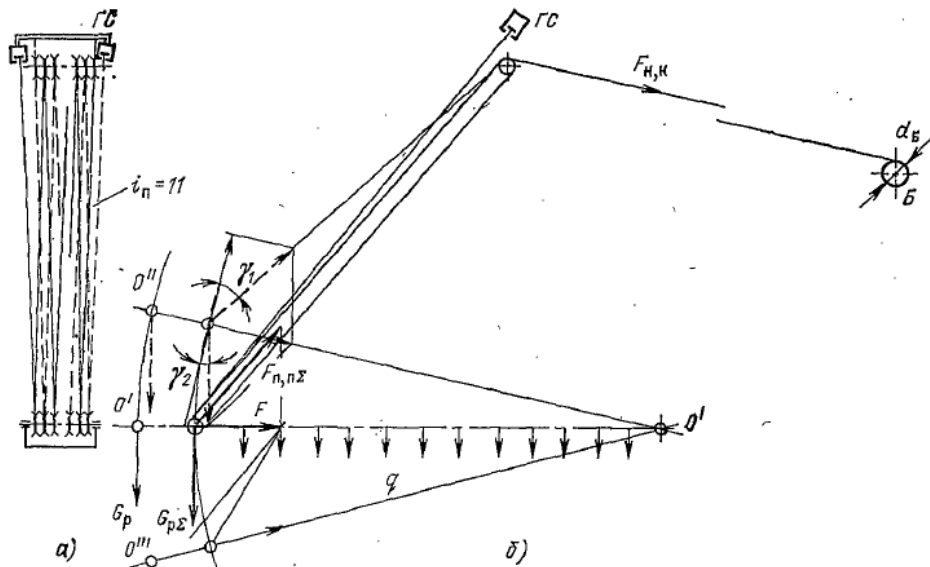


Рисунок 2.5 – Поліспадна підвіска (а) і схема зусиль, що діють на привід підйому стріли ротора (б)

Схема статичних зусиль, що визначають навантаження електроприводу підйому і опускання стріли, показана на рис. 2.5,б, Момент статичного навантаження щодо осі гойдання стріли ротора, який і сприймається через перехресну поліспадну підвіску (рис. 2.5, а) підйомної лебідкою, визначається розподіленою силою ваги q конструкції стріли, конвеєра, що знаходиться на ньому породи, а також вагою роторного колеса G_p .

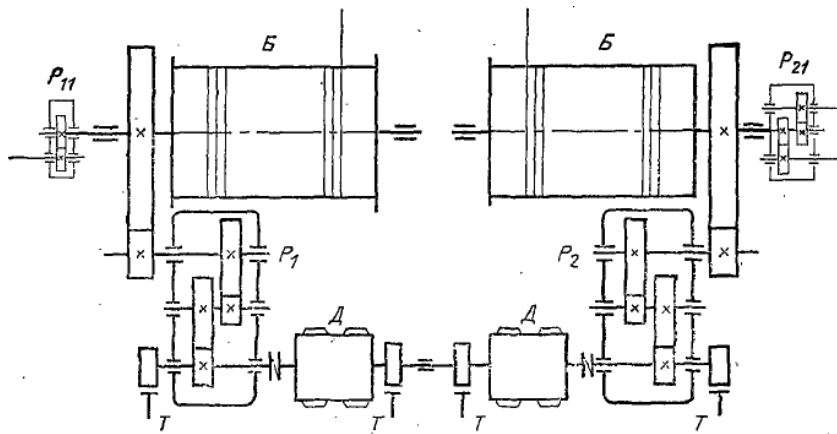
Приклавши рівнодіюча цих сил до точки установки блоків поліспадового підвіски на стрілі і побудувавши її складові по осі стріли і напрямку дії підвіски, отримаємо діаграми сил, показані для двох кутових положень стріли. З діаграм видно, що зусилля, яке сприймає поліспадною підвіскою, $F_{П, ПΣ}$ можна визначити з умови рівності моментів сил щодо осі кочення стріли $0'$:

$$F_{П, ПΣ} = G_{PΣ} \frac{\cos \gamma_2}{\cos \gamma_1} \tag{2.19}$$

Безпосередньо до барабанів підйомних лебідок прикладена сила натягу канатів $F_{H, K}$, яка без урахування втрат в поліспадах дорівнює:

$$F_{H, K} = F_{П, ПΣ} / (j_{П, C} i_{П}), \tag{2.20}$$

де $j_{П, C}$ - число поліспадної системи; $i_{П}$ - кратність поліспастів.



**Рисунок 2.6 – Схема механізму приводу барабанів підйомних лебідок
стріли ротора**

Поліспасти підвіски стріли ротора (рис. 2.5, а) виконуються подвійними ($i_{п} = 11$) з гідросистемою ГС, що дозволяє вирівняти навантаження кожного поліспасти. Запасовка канатів виконана перехресної, що дозволяє уникнути скручування стріли при заміні або ослабленні одного з канатів.

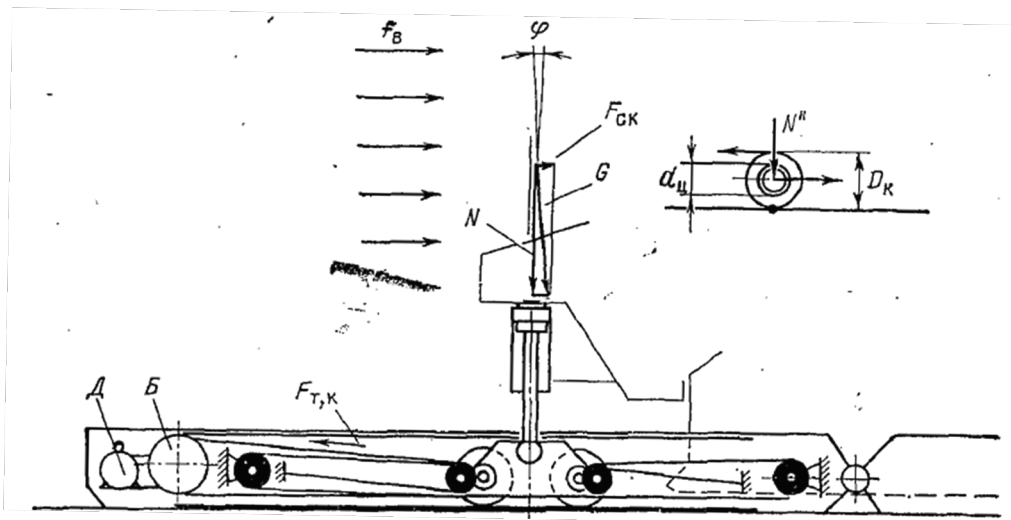


Рисунок 2.7 – Схема механізму ходу візків екскаватора

Механізм підймання та опускання стріли ротора крім поліспастового підвіски має дві лебідки, на барабани яких навиваються канати кожної з поліспастих підвісок (рис. 2.6). Барабани підйомних лебідок приводяться в дію через індивідуальні редуктори P_1, P_2 відкриті зубчасті пари. Момент статичного опору на валу приводних двигунів з урахуванням ККД поліспастих ($\eta_{п}$) і



передавального механізму (редуктора) ($\eta_{п, м}$) дорівнює:

$$M_{с,п} = F_{H,K} d_{\sigma} / (2j_{п} j_{п,м} i_p). \quad (2.21)$$

Таблиця 2.1 - Технічна характеристика ЕРШР -1600

Параметр	ЕРШР -1600 40/7
Теоретична продуктивність по пухкій масі Q_T , м ³ /год	5000
Розрахунковий питомий опір копання K_F , МН/м ³ (МПа)	0.8
Висота верхнього копання $h_{В.К}$, м	40
Висота нижнього копання $h_{Н.К}$, м	7
Ширина заходки, м	80
Висота шару h_c , м	10,5
Кут укосу вибою ρ_3 , град	45
Кут укосу уступу ρ_y , град	40
Діаметр колеса по ріжучим краям	16
Ємність ковша E , м ³	1,6
Кількість ковшів z_k .	10
Число розгрузок ковшів n_z об/хв	36-52
Лінійна швидкість обертання по краям ковшів v_E , м / с	0,11-0.44
Швидкість підйому стріли по центру ротора $v_{п}$, м / с	0,07
Ходове обладнання	Крокуюче-рейковий
Транспортна швидкість $v_{тр}$, м/год	125
Хід з лиж $L_{ш}$, м	9,0
Допустимий ухил траси $\gamma_{п}$, град:	
при роботі	2
при перегоні	4
Ширина стрічки конвеєрів B , м	2
Швидкість стрічки v_L , м / с	3,95
Маса екскаватора m_E т	4250



Привід лебідок підйому стріли ротора екскаватора ЕРШР-1600, який наведено на рис. 2.6, на кожному з швидкохідних валів має два фрикційних гальма T . З валом барабанів B пов'язані несилкові редуктори P_{11} , P_{22} через які приєднуються тахогенератор і сельсини.

Статичне навантаження приводу крокуюче-рейкового ходу при переміщенні екскаватора визначається наступними факторами: тертям кочення ходових коліс, тертям в підшипниках ходових коліс, подоланням скочується сили при негоризонтального установці лиж, дією вітрового напору, опором породи при врізки роторного колеса подачею на забій.

Схема механізму ходу однієї ходової візки для розрахунку зусилля в тяговому канаті зображена на рис. 2.7 (одна з чотирьох лиж екскаваторів ЕРШР-1600, ЕРШРД-5000, ЕРШР-5000).

2.2. Характеристика електроприводу роторного колеса

Роторне колесо виконує головний робочий рух, що забезпечує різання ґрунту, і його електропривод повинен працювати в тривалому режимі. У зв'язку з відсутністю технологічної необхідності зміни напрямку обертання роторного колеса електропривод може бути нереверсивним.

Для забезпечення раціональних режимів різання різних за міцністю ґрунтів та ефективного використання конструктивних можливостей, екскаватора електропривод повинен забезпечувати зниження кутової швидкості роторного колеса на 30-60% по відношенню до номінальної. Отже, необхідний діапазон регулювання D який визначається як відношення середніх значень максимальної швидкості до мінімальної

$$D = \omega_{cp \max} / \omega_{cp \min} \cdot \quad (2.22)$$

лежить в межах (1,4-1,7): 1.

Для усунення можливих резонансних коливань металоконструкцій, бажаним є безступінчасте регулювання швидкості. Характер перехідних



процесів повинен бути оптимальним, забезпечує обмеження динамічних навантажень механізму і металокопструкції.

Особливістю механізму є необхідність регулювання швидкості приводу практично тільки в процесі різання, та під навантаженням. При істотних обмеженнях на динамічні навантаження, а значить, і на прискорення електропривод як при розгоні, так і при гальмуванні буде працювати тільки в руховому режимі. Отже, забезпечення електроприводом рекуперативного гальмування не є обов'язковим.

Механічна характеристика електроприводу, що представляє залежність кутової швидкості електродвигунів від електромагнітного моменту $\omega = f(M)$, повинна мати екскаваторного форму (рис. 8). Для електроприводу роторного колеса потрібно максимально висока жорсткість робочого ділянки механічної характеристики. При недостатній жорсткості зусилля різання викличуть відповідні коливання швидкості електродвигунів і роторного колеса, які будуть тим більше, чим м'якше характеристика. Коливання швидкості можуть додатково посилюватися внаслідок обернено пропорційній залежності між лінійною швидкістю різання і площею поперечного перерізу зрізаних стружок, а отже, і моментом навантаження електроприводу. Це може привести до небажаних коливань роторного стріли з небезпекою виникнення резонансних явищ в металокопструкціях екскаватора.

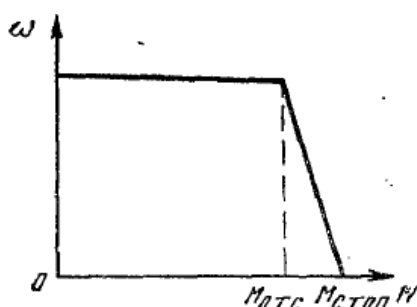


Рисунок 2.8 – Екскаваторна механічна характеристика

Можливість технологічних перевантажень і режимів стопоріння при зустрічі ковшів з непереборною перешкодою зумовила вимога обмеження розвивається двигунами моменту на допустимому рівні. Ділянка обмеження



моменту механічної характеристики зазвичай має коефіцієнт відсічення, що дорівнює:

$$k_{отс} = M_{отс} / M_{стоп} = 0.8,$$

де $M_{отс}$ – момент відсічення, перевищення якого супроводжується переходом з робочої ділянки механічної характеристики на ділянку обмеження моменту; $M_{стоп}$ – момент стопоріння, відповідає максимально допустимому за умовами міцності механізму моменту.

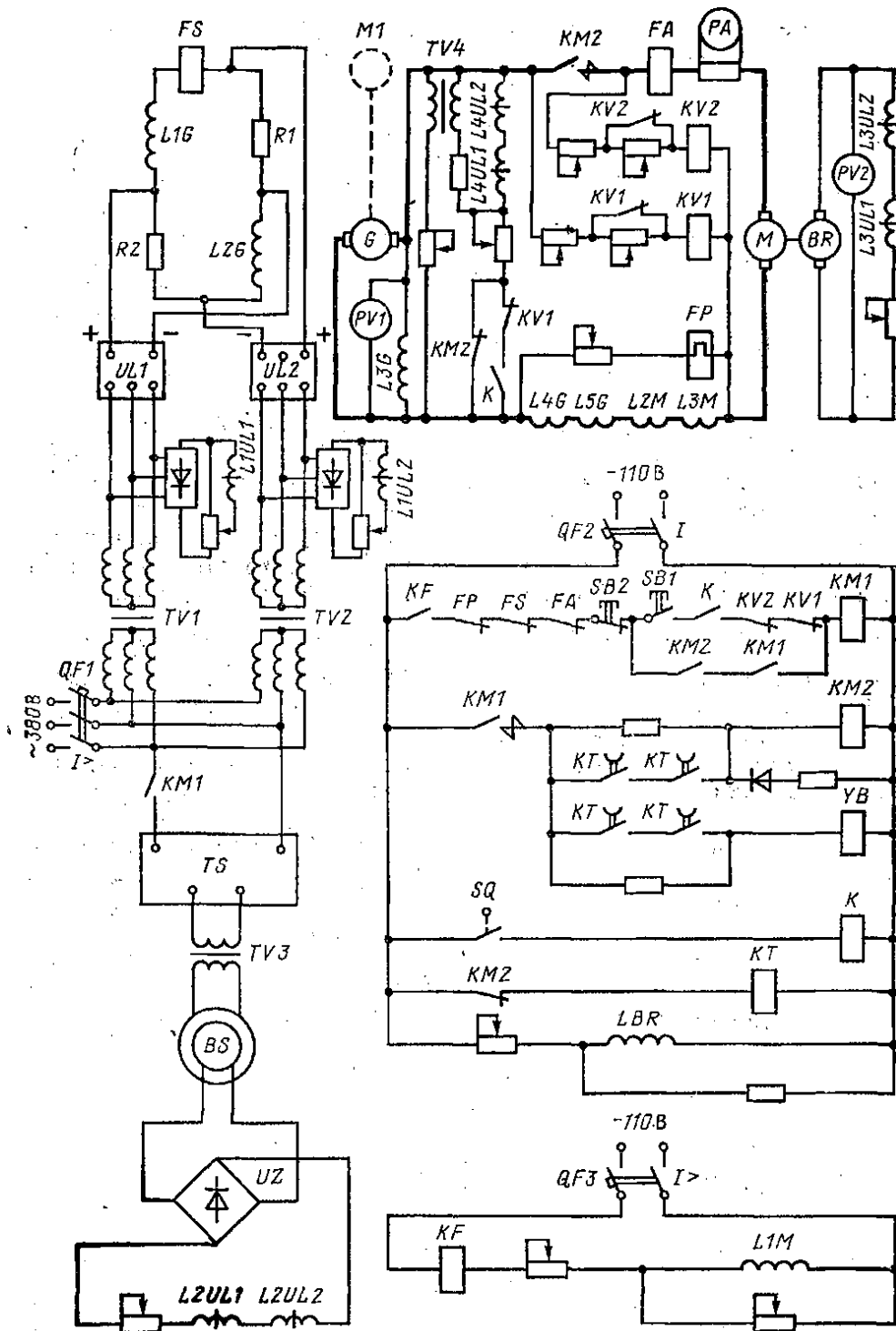
Таке значення $k_{отс}$ дає можливість машиністу екскаватора, електроприводи якого не мають автоматичного регулювання швидкості повороту стріли ротора в залежності від навантаження приводу роторного колеса, по швидкості приводу оцінювати його навантаження і своєчасно управляти електроприводами роторного колеса і повороту стріли ротора, не допускаючи їх перевантаження і стопоріння.

Використання екскаваторної механічної характеристики в застосовуваних електроприводах роторного колеса не виключає в режимах стопоріння неприпустимих динамічних навантажень механічного обладнання, тому в кінематичне коло механізму вводиться ланка з обмеженим граничним переданим моментом.

Електродвигуни повинні бути закритого виконання, допускати роботу при вібраціях і в похилому положенні, а також оснащуватися пристроями очищення від пилу повітря, використовуваного для охолодження електродвигунів.

Схема управління електроприводом роторного колеса ЕРШР -1600 зображена на рис. 2.9.

Для живлення двигуна M використовується генератор G (Система Г-Д) з двома обмотками збудження (ОВ) на головних полюсах: незалежної, розділеної на дві однакові напівобмотки $L1G$, $L2G$, і паралельної $L3G$, Що здійснює самозбудження генератора і дає в номінальному режимі близько 30% сумарної МДС генератора.



**Рисунок 2.9 - Схема управління електроприводом роторного колеса
екскаватора ЕРШР -1600**

Незалежна ОВ живиться від двотактного МУ, що складається з двох трифазних однотактний МУУЛ1, УЛ2. Магнітні підсилювачі мають по чотири обмотки управління, з них LIUL1 і LIUL2 застосовуються для зміщення характеристик вхід-вихід підсилювачів UL1, UL2 і формування необхідної



результуючої характеристики двотактного МУ, інші обмотки застосовуються для введення сигналів завдання і ОС.

Система автоматичного керування електроприводом замкнута з сумуючим підсилювачем. Вона має дві основні ОС: жорстку ОС по швидкості двигуна і гнучку ОС по напрузі генератора G .

Як підсумовує підсилювача використовується безпосередньо МУ - збудник генератора. Сигнал завдання надходить на обмотки управління $L2UL1$ і $L2UL2$ з виходу; сельсінного командоапарата BS через випрямляч UZ . Напруга живлення командоапарата підтримується незмінним стабілізатором TS . Струм, що протікає на обмотках $L2UL1$, $L2UL2$, залежить від положення рукоятки BS .

Зворотній зв'язок по швидкості здійснюється за допомогою тахогенератора BR через обмотки МУ $L3UL1$, $L3UL2$. Гнучка ОС по напрузі забезпечується за допомогою диференціючого трансформатора $TV4$, Первинна обмотка якого підключена паралельно якоря генератора, а вторинна замкнута через обмотки МУ $L4UL1$, $L4UL2$. через; ці ж обмотки подається сигнал додаткової жорсткої ОС по напрузі генератора, яка гасить його поле при розмиканні якірного кола контактором $KM2$ або після повернення командоапарата BS в нульове положення (включається реле K) і зниження напруги генератора нижче встановленого для робочого режиму мінімуму (відключається реле KVI). Зворотного зв'язку за струмом якоря з відсіченням схема не має, обмеження моменту при стопорінні проводиться тільки за рахунок запобіжної муфти і реле максимального струму FA в якірного кола.

Релейно-контакторна частина схеми управління наповнює наступні захисту і блокування: від обриву поля двигуна (реле струму KF), від максимального струму в якорі і кола збудження генератора (реле FA і FS), від перевантаження по струму в якорі (теплове реле FP) контроль напруги-генератора і двигуна (реле напруги KVI і $KV2$), фіксація нульового положення командоапарата (шляховий вимикач SQ і допоміжної реле K). Є також не вказані на схемі (рис. 2.10) апарати, які контролюють, чи запущений двигун агрегату $M1$, Чи працюють вентилятори охолодження електричних машин і подається чи



мастило в редуктор, які при невиконанні перерахованих умов відключають привід і перешкоджають його включенню.

Для підготовки схеми до роботи необхідно запустити перетворений агрегат *MI-G* і включити автоматичні вимикачі *QF1-QF3* за допомогою яких подається напруга живлення МУ, обмоток збудження двигуна *LIM* і тахогенератора *LBR* і схеми управління приводом.

При нормальному стані всіх захистів і блокувань натисканням кнопки *SBI* включається контактор нульового захисту *KM1*. Через свої контакти *KM1* подає живлення на командоапарат *BS*, включає лінійний контактор *дм2*, комутуючий якірне коло електроприводу, і електромагніт *УВ*, Який відсуває гальмівні колодки від шківів на валу двигуна. включення *KM2* і *УВ* виробляється з форсуванням за допомогою контактів реле часу *КТ*, тимчасово шунтуючих додатковий опір в колі живлення котушок *KM2* і *УВ*.

2.3. Перспективи розвитку електроприводу

За останній час в країні і за кордоном створені машини безперервного дії високої продуктивності як для розкривних, так і для видобувних робіт. Створення таких унікальних машин викликало значне зростання потужностей електроприводів головних механізмів.

Для головних механізмів повороту, ходу, роторного колеса, конвеєрів на потужних екскаваторах найбільш доцільним є привід постійного струму. Застосування системи Г-Д забезпечує плавне регулювання частоти обертання двигуна. необхідну форму його механічної характеристики і високі динамічні якості приводу.

У схемах нових типів екскаваторів передбачається створення електроприводів змінного струму на базі асинхронних двигунів з живленням від перетворювачів частоти. У роторному екскаваторі ЕРШР -1600 передбачається дводвигуновий привід роторного колеса по системі ПЧ-АД з двигуном



потужністю 1200 кВт (табл.2.2). Загальний діапазон зміни швидкості складає 1:10, а робочий діапазон - 1: 4. Ця система приводу є найбільш перспективною.

Таблиця 2.2 – Параметри приводного АД електроприводу роторного колеса.

Номінальна потужність, кВт	1200
Номінальна напруга, В	6000
Синхронна швидкість, об / хв	750
Номінальне ковзання%	0,004
номінальний ККД	0,92
Номінальний коефіцієнт потужності	0,89
Кратність максимального моменту	2,1
Кратність пускового моменту	1,8
Кратність пускового струму	8,0

2.4. Визначення параметрів схеми заміщення

Для визначення параметрів АД застосовуємо Т-подібну схему заміщення, наведену на рис. 2.10.

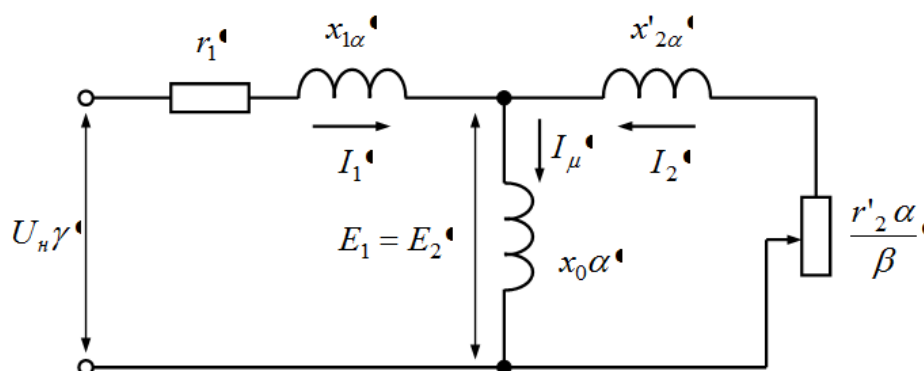


Рисунок 2.10 – Схема заміщення фази асинхронного двигуна при частотному управлінні

Розрахунок параметрів двигуна за каталожними даними проводимо за методикою, викладеною в [8].

Одними з найважливіших параметрів, що характеризують режим роботи асинхронного двигуна, є відповідні номінальні значення наведеного струму



ротора $I'_{2,ном}$ і намагнічує струму $I_{0ном}$. Оскільки при переході від ідеального холостого ходу (ковзання $s = 0$) до номінального режиму ($s = s_{ном}$) магнітний потік практично не змінюється, то $I_{0ном}$ можна прийняти рівним току холостого ходу $I_{0х}$, Виміряного при роботі двигуна без навантаження на валу. визначимо значення $I'_{2,ном}$ і $I_{0ном}$ за каталожними даними номінального струму статора $I_{1ном}$, Кратності максимального моменту $b_{ном}$ і номінального коефіцієнта потужності двигуна $\cos \phi_{ном}$.

$$I_{1ном} = \frac{P_{1н}}{3U_{1н}\eta_n \cos \phi_{ном}} \quad (2.23)$$

$$I_{1ном} = \frac{1200000}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,89 \cdot 0,96} = 135 \text{ А}$$

На підставі наведених у [8, гл. 1] основних співвідношень і векторної діаграми асинхронного двигуна струм статора може бути представлений геометричній сумою намагнічує струму і наведеного струму ротора, а отже, при номінальному режимі

$$I_{1ном} = \sqrt{(I_{0ном} \sin \phi_{0ном} + I'_{2ном} \sin \phi'_{ном})^2 + (I_{0ном} \cos \phi_{0ном} + I'_{2ном} \cos \phi'_{ном})^2} \quad (2.24)$$

або без обліку активних втрат в сталі ($\cos \phi_{0ном} = 0$)

$$I_{1ном} = \sqrt{(I_{0ном} + I'_{2ном} \sin \phi'_{ном})^2 + (I'_{2ном} \cos \phi'_{ном})^2}; \quad (2.25)$$

а реактивна складова струму статора

$$I_{1р,ном} = I_{1ном} \sin \phi_{ном} \approx I_{0ном} + I'_{2ном} \sin \phi'_{ном} \quad (2.26)$$

і активна складова

$$I_{1а,ном} = I_{1ном} \cos \phi_{ном} \approx I'_{2ном} \cos \phi'_{ном}. \quad (2.27)$$

для виразу $\sin \phi'_{ном}$ і $\cos \phi'_{ном}$ через кратність максимального моменту скористаємося рівністю [з урахуванням, нехтуючи активним опором статора r_1 порівняно з $c_1 r_2' / s$ і r_1^2 порівняно з $(x_1 + c_1 x_2')^2$ в [8, (2.3)]:



$$\operatorname{tg} \phi'_{\text{ном}} = \frac{(x_1 + c_1 x_2') s_{\text{ном}}}{c_1 r_2'} \approx \frac{s_{\text{ном}}}{s_{\text{кр}}} \quad (2.28)$$

а також вирішимо рівняння при номінальному режимі ($M_* = 1,0$) щодо $s_{\text{кр}} / s_{\text{ном}}$:

$$\frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{ном}}} = b_{\text{ном}} + \sqrt{b_{\text{ном}}^2 - 1} \quad (2.29)$$

$$s_{\text{кр}} = 0,004(2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1}) = 0,016$$

що при підстановці в (2.27) дає шукані вирази:

$$\operatorname{tg} \phi'_{\text{ном}} \approx \frac{1}{b_{\text{ном}} + \sqrt{b_{\text{ном}}^2 - 1}} \quad (2.30)$$

$$\sin \phi'_{\text{ном}} \approx \frac{1}{\sqrt{2b_{\text{ном}} (b_{\text{ном}} + \sqrt{b_{\text{ном}}^2 - 1})}} \quad (2.31)$$

$$\cos \phi'_{\text{ном}} \approx \sqrt{\frac{b_{\text{ном}} + \sqrt{b_{\text{ном}}^2 - 1}}{2b_{\text{ном}}}} \quad (2.32)$$

Підставляючи (2.32) в (2.28), знаходимо номінальний наведений струм ротора

$$I'_{2\text{ном}} \approx \sqrt{\frac{2b_{\text{ном}}}{b_{\text{ном}} + \sqrt{b_{\text{ном}}^2 - 1}}} I_{1\text{ном}} \cos \phi_{\text{ном}} \quad (2.33)$$

$$I'_{2\text{ном}} \approx \sqrt{\frac{2 \cdot 2,1}{2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1}}} 135 \cdot 0,89 = 130 \quad \text{А}$$

і, замінюючи $\sin \phi'_{\text{ном}}$ згідно (2.31), знаходимо з (2.27) після підстановки (2.33) номінальне значення намагнічує струму

$$I_{0\text{ном}} \approx I_{1\text{ном}} \left(\sin \phi_{\text{ном}} \frac{\cos \phi_{\text{ном}}}{b_{\text{ном}} + \sqrt{b_{\text{ном}}^2 - 1}} \right)$$

$$I_{0\text{ном}} \approx 135(0,73 \frac{0,89}{2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1}}) = 31 \quad \text{А}$$



при $b_{ном} > 1,7$ можна прийняти

$$I'_{2ном} \approx I_{1ном} \cos \phi_{ном}, \quad (2.34)$$

оскільки похибка в порівнянні $I'_{2ном}$, знайденої згідно (2.33), буде менше 5%.

У каталогах також зазвичай наводяться кратності початкового моменту $\frac{M_n}{M_{ном}} = M_{к*}$ (При $s = 1,0$) і пускового струму $k = I_n / I_{1ном} = I_k / I_{1ном}$ при номінальній напрузі. За вказаними вище даними можна визначити активну і індуктивний опори обмоток статора і ротора.

За кратності початкового пускового струму знаходимо повне опір двигуна при нерухомому роторі ($s = 1,0$):

$$z_{к1} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}kI_{1ном}}, \quad (2.35)$$

де $U_{1ном}$ - номінальна лінійна напруга статора.

$$z_{к1} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 8 \cdot 135} = 1,07 \text{ Ом}$$

За кратністю пускового моменту $M_{к*}$ визначаємо по наведене активний опір ротора при $s = 1$, механічні втрати приймаємо рівними 1%, тобто $\Delta P_{мех} = 0,01\Delta P_{ном}$:

$$r'_{21} = \frac{(P_{ном} + \Delta P_{мех})M_{к*}}{3(1-s_{ном})I_{2к}^2} \approx \frac{(P_{ном} + \Delta P_{мех})M_{к*}}{3(1-s_{ном})k^2I_{1ном}^2}. \quad (2.36)$$

$$r'_{21} = \frac{1 \cdot 1,01 \cdot 10^3 \cdot 1200}{3(1-0,004)8^2 \cdot 135^2} = 0,14 \text{ Ом}$$

За кратністю максимального моменту $b_{ном}$ визначаємо по індуктивний опір приведенного струму ротора при $s = 0$, нехтуючи r_1^2 порівняно з $(x_1 + c_1x'_{20})^2$:

$$x_1 + c_1x'_{20} \approx \frac{U_{1ном}^2(1-s_{ном})}{2c_1(P_{ном} + \Delta P_{мех})b_{ном}} - r_1. \quad (2.37)$$



Замінюючи критичне ковзання відповідно до значення (2.28), визначаємо по приведений активний опір ротора при $s = 0$:

$$r'_{20} \approx \frac{(x_1 + c_1 x'_{20}) s_{кр0}}{c_1} = \frac{(x_1 + c_1 x'_{20}) s_{ном} (b_{ном} + \sqrt{b_{ном}^2 - 1})}{c_1}, \quad (2.38)$$

де $(x_1 + c_1 x'_{20})$ замінюються згідно(2.37).

Якщо невідомий активний опір статора, то з достатнім ступенем точності можна прийняти, що $r_1 = r'_{20}$. В цьому випадку, вирішуючи (2.36) і (2.37) щодо r'_{20} , отримуємо

$$r'_{20} = \frac{U_{ном}^2 (1 - s_{ном})}{2c_1 (P_{ном} + \Delta P_{мех}) b_{ном} \left[1 + \frac{c_1}{s_{ном} b_{ном} + \sqrt{b_{ном}^2 - 1}} \right]} \quad (2.39)$$

$$r'_{20} = \frac{6000^2 (1 - 0,016)}{2 \cdot 1,03 \cdot 135 \cdot 10^3 \cdot 1,01 \cdot 2,1 \left[1 + \frac{1,03}{0,004(2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1})} \right]} = 0,035 \quad \text{Ом}$$

Індуктивний опір статора і ротора при $s = 1$ без урахування намагнічуючого струму не завжди дає позитивний результат, тому краще скористатися виразом для критичного ковзання і з нього отримати значення X_k

$$s_k = \frac{R_2^1}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \quad (2.40)$$

$$X_k = 7 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір контуру намагнічування

$$X_\mu = \frac{U_{1, \dots}}{\sqrt{3} I_{\mu, \dots}}$$

$$X_\mu = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 31} = 64 \quad \text{Ом}$$

Спільне рішення рівнянь (2.36) і (2.39) дозволяє визначити значення x_1 , x'_{20} і x'_{21} , з огляду на x_1 / x'_{20} , Наприклад згідно.



При визначенні втрат в роторі слід мати на увазі, що номінальне ковзання, визначене за табличним даними, може значно відрізнятись від дійсного значення. Тому бажано визначити номінальне значення ковзання з досвіду. Для цієї мети при навантаженні, можливо більш близькою до номінальної, визначають споживану двигуном потужність P_1 і ковзання s .

Ковзання при номінальному навантаженні досить точно можна визначити за формулою

$$s_{\text{ном}} \approx s \frac{P_{a,\text{ном}}}{P_a} \approx \frac{s P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}} P_1} \quad (2.41)$$

2.5. Розрахунок статичних характеристик електроприводу

2.5.1. Спосіб регулювання швидкості в системі перетворювач частоти - двигун змінного струму перспективний як для окремих регульованих АД і СД, так і при одночасній зміні швидкості декількох АТ, що приводять у рух групи механізмів - текстильних машин, конвеєрів, рольгангів і т.д. Там, де необхідно отримати високі швидкості, наприклад, центрифуг, шліфувальних верстатів, регулювання швидкості АД зміною частоти напруги живлення переважно, а в деяких випадках це єдиний з існуючих способів [9].

Можливість регулювання швидкості АД і СД при зміні частоти слід безпосередньо з виразу

$$\omega = 2\pi f_1 / p \quad (2.42)$$

При регулюванні частоти необхідно змінювати і значення живить двигун напруги. Це пояснюється тим, що при постійній нарузі джерела живлення U_1 і регулювання його частоти змінюється магнітний потік АД, оскільки $U_1 \approx k\Phi f_1$.

При виборі співвідношення між частотою і напругою, що підводиться до статора АД, виходять з умови збереження перевантажувальної здатності:

$$\lambda = M_k / M_c = \text{const} \quad (2.43)$$

Закон зміни напруги при частотному регулюванні швидкості АД, що



задовольняє вимогу (2.42) при допущенні, що активний опір статора $r_1 = 0$:

$$\frac{U_{1j}}{U_{1\kappa}} = \frac{f_{1j}}{f_{1\kappa}} \sqrt{\frac{M_c(\omega_j)}{M_c(\omega_\kappa)}}, \quad (2.44)$$

де U_{1j} - фазна напруга джерела живлення асинхронного двигуна при частоті f_{1j} ; $M_c(\omega_j)$ - момент статичного навантаження на валу двигуна при швидкості ω_j ; $U_{1\kappa}$ - фазна напруга джерела живлення АД при частоті $f_{1\kappa}$; $M_c(\omega_\kappa)$ - момент статичного навантаження на валу двигуна при швидкості ω_κ .

У відносних одиницях закон зміни напруги при частотному регулюванні

$$U_{1*} = f_{1*} \sqrt{M_{c*}}, \quad (2.45)$$

де $U_{1*} = U_1 / U_{1ном}$; $f_{1*} = f_1 / f_{1ном}$; $M_{c*} = M_c / M_{ном}$.

при $M_c = const$ (2.29) запишеться у вигляді

$$U_{1*} = f_{1*}, \quad (2.46)$$

або $U_1 / f_1 = const$.

при $P_c = M_c \omega = const$

$$U_{1*} = \sqrt{f_{1*}} \quad (2.47)$$

або $U_1 / \sqrt{f_1} = const$.

При вентиляторної навантаженні

$$U_{1*} = f_{1*}^2, \quad (2.48)$$

або $U_1 / f_1^2 = const$.

Уточнений закон зміни напруги при частотному регулюванні з урахуванням $r_1 \neq 0$ має вигляд:

$$U_{1*} = \sqrt{\frac{f_{1*} \rho_{1\kappa} + \sqrt{(f_{1*}^2 + \rho_{1\kappa}^2)(f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2)}}{\rho_{1\kappa} + \sqrt{(1 + \rho_{1\kappa}^2)(1 + \rho_{1\mu}^2)}}} M_{c*}(f_{1*}), \quad (2.49)$$

де $\rho_{1\kappa} = r_1 / x_{\kappa,ном}$; $\rho_{1\mu} = r_1 / x_{\mu,ном}$; $x_{\kappa,ном}$ - індуктивний опір короткого



замикання АТ при номінальній частоті; $x_{\mu ном}$ - індуктивний опір намагнічування АД при номінальній частоті.

$$\rho_{1\kappa} = \frac{0,63}{6,65} = 94,7 \cdot 10^{-3} \quad , \quad \rho_{1\mu} = \frac{0,63}{192,4} = 3,27 \cdot 10^{-3}$$

Розрахунок механічних характеристик АД при частотному регулюванні швидкості по уточненого закону (2.49) ведеться в наступній послідовності.

Розраховується значення критичного моменту АД при частотному регулюванні за формулою

$$M'_{\kappa} = \frac{3}{2} \frac{U_1^2}{\omega_{0ном} x_{\kappa,ном} (f_{1*} \rho_{1\kappa} \pm \sqrt{(f_{1*}^2 + \rho_{1\kappa}^2)(f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2)})} \quad (2.50)$$

де $\omega_{0ном}$ - синхронна швидкість АТ при номінальній частоті.

Розраховується значення критичного ковзання АД при частотному регулюванні

$$s'_{\kappa} = \pm \frac{r'_2}{f_{1*} x_{\kappa,ном}} \sqrt{\frac{f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2}{f_{1*}^2 + \rho_{1\kappa}^2}} \quad (2.51)$$

Механічні характеристики будуються за формулою Клосса

$$M = \frac{2M'_{\kappa} (1 + a' s'_{\kappa})}{s / s'_{\kappa} + s'_{\kappa} / s + 2a' s_{\kappa}} \quad (2.52)$$

де

$$a' = \frac{r_1 f_{1*}^2}{r'_2 (f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2)} \quad (2.53)$$

Для ряду значень частот обчислимо значення M'_{κ} , s'_{κ} , a' і результат занесемо в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 - Константи для розрахунку механічних характеристик

f_1 , Гц	f_{1*}	M'_{κ}	s'_{κ}	a'
50	1,0	21,9	0,16	0,58
40	0,8	32,1	0,20	0,58
30	0,6	56,2	0,26	0,58
20	0,4	109	0,39	0,58
10	0,2	366	0,72	0,58



Механічні характеристики для ряду частот зображені на рис. 2.11.

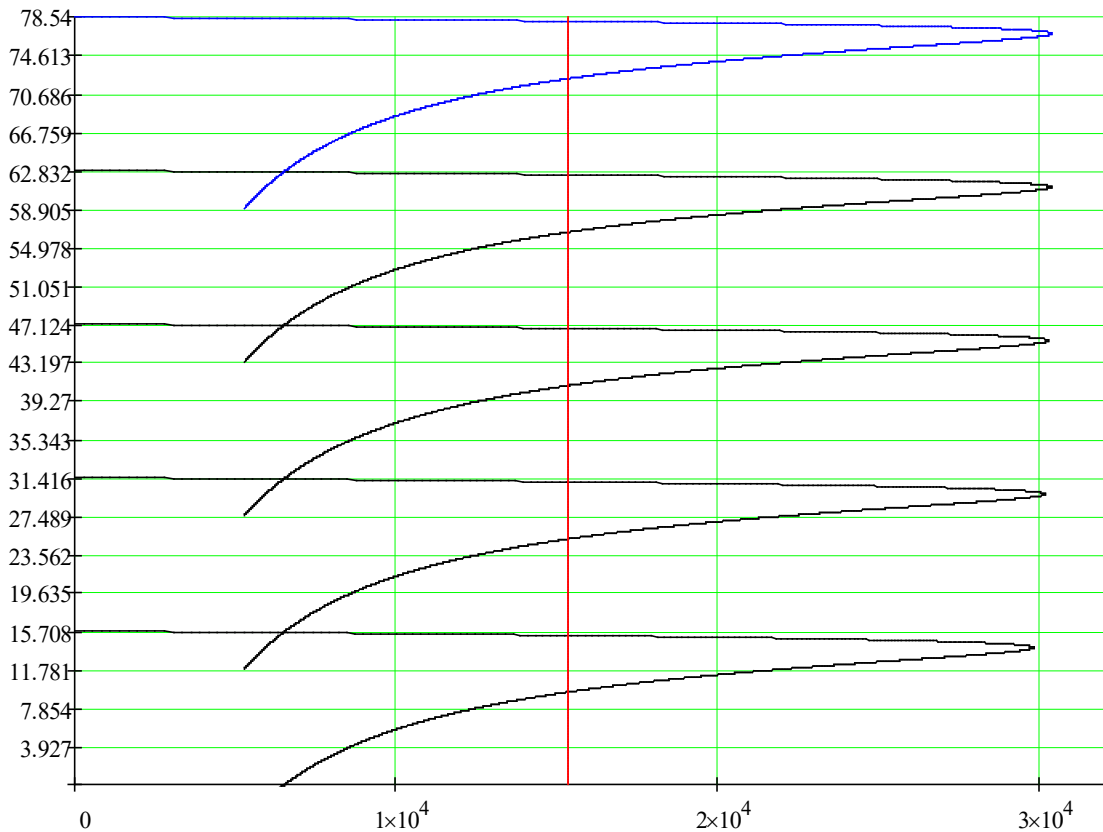


Рисунок 2.11 – Механічні характеристики АД при частотному регулюванні швидкості для ряду частот

Розрахунок механічних характеристик при частотному регулюванні швидкості за законом (2.45), що допускає $r_1 = 0$, ведеться за формулами, в яких значення індуктивних опорів повинні відповідати частоті f_1 , а саме:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{1,ном} f_{1*}; & x'_2 &= x'_{2,ном} f_{1*}; \\ x_k &= x_{k,ном} f_{1*}; & x_\mu &= x_{\mu,ном} f_{1*}. \end{aligned} \quad (2.54)$$

допущення $r_1 = 0$ типове для АД великої потужності при зміні частоти, а значить, і швидкості нижче основної в діапазоні до 2-2,5. Для великих значень діапазону регулювання швидкості необхідно розрахунок характеристик вести з урахуванням $r_1 \neq 0$. При регулюванні швидкості вгору від основної допущення $r_1 = 0$ типове.

2.2.2. Вжитими припущеннями обумовлюється сталість опорів схеми



заміщення при даній частоті; застосовується Т-подібна схема заміщення, наведена на рис. 3.1. індуктивні опори x_0, x_1, x_2' відповідають номінальній частоті. При аналізі та розрахунках використовуються такі позначення .

Відносна частота статора - відношення частоти струму статора до її номінального значення

$$\alpha = f_1 / f_{1n} . \quad (2.55)$$

Параметр абсолютного ковзання, або відносна частота ротора – відношення абсолютного ковзання $\Delta\omega$ до синхронної швидкості при номінальній частоті

$$\beta = \Delta\omega / \omega_{1n} = (\omega_1 - \omega) / \omega_{1n} = f_2 / f_{1n} . \quad (2.56)$$

параметр β використовується замість ковзання s і пов'язаний з ним співвідношенням

$$s = \Delta\omega / \omega_1 = f_2 f_{1n} / f_1 f_{1n} = \beta / \alpha . \quad (2.57)$$

відносна напруга

$$\gamma = U / U_n . \quad (2.58)$$

Коефіцієнт розсіювання відповідно для статора і ротора

$$\tau_1 = \frac{x_1}{x_0} \quad \tau_2 = \frac{x_2'}{x_0} . \quad (2.59)$$

Загальний коефіцієнт розсіювання

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 . \quad (2.60)$$

Крім того, введемо позначення:

$$b = r_1(1 + \tau_2) ; \quad (2.61)$$

$$c = x_0 \tau ; \quad (2.62)$$

$$d = r_1 / x_0 ; \quad (2.63)$$

$$e = 1 + \tau_1 . \quad (2.64)$$

Аналіз і розрахунки усталеного режиму проводяться в діючих значеннях величин. З розрахунку схеми заміщення отримуємо:

електрорушійну силу



$$E_{1\alpha} = E'_{2\alpha} = U_n \gamma \alpha \sqrt{\frac{r_2'^2 + x_2'^2 \beta^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 r_2' \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2'^2}} =$$

$$= U_n \gamma \alpha \sqrt{\frac{B(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}; \quad (2.66)$$

потік в повітряному зазорі

$$\Phi_\alpha = \frac{U_n}{c_1 f_{1H}} \gamma \sqrt{\frac{r_2'^2 + x_2'^2 \beta^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 r_2' \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2'^2}} =$$

$$= \frac{U_n}{c_1 f_{1H}} \gamma \sqrt{\frac{B(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}; \quad (2.67)$$

струм статора

$$I_{1\alpha} = U_n \gamma \sqrt{\frac{r_2'^2 / x_0^2 + (1 + \tau_2)^2 \beta^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 r_2' \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2'^2}} =$$

$$= U_n \gamma \sqrt{\frac{C(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}; \quad (2.68)$$

приведений струм ротора

$$I'_{2\alpha} = U_n \gamma \frac{\beta}{\sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 r_2' \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2'^2}} =$$

$$= U_n \gamma \frac{\beta}{\sqrt{A(\alpha, \beta)}}; \quad (2.69)$$

струм намагнічування

$$I_{\mu\alpha} = U_n \gamma \sqrt{\frac{r_2'^2 / x_0^2 + \tau_2^2 \beta^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 r_2' \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2'^2}} =$$

$$= U_n \gamma \sqrt{\frac{D(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}; \quad (2.70)$$

електромагнітний момент двигуна

$$M_\alpha = \frac{m_1 U_n^2}{\omega_{1H}} \gamma^2 \frac{r_2' \beta}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 r_2' \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2'^2} =$$

$$= \frac{m_1 U_n^2}{\omega_{1H}} \gamma^2 \frac{r_2' \beta}{A(\alpha, \beta)}. \quad (2.71)$$

В (2.49) - (2.54) прийняті наступні позначення:

$$A(\alpha, \beta) = (b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 r_2' \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2'^2; \quad (2.72)$$



$$B(\beta) = r_2'^2 + x_2'^2 \beta^2 ; \tag{2.73}$$

$$C(\beta) = r_2'^2 / x_0^2 + (1 + \tau_2)^2 \beta^2 ; \tag{2.74}$$

$$D(\beta) = r_2'^2 / x_0^2 + \tau_2^2 \beta^2 ; \tag{2.75}$$

$c_1 = 4,44w_1k_w$ - конструктивна стала фазной обмотки статора двигуна; m_1 - число фаз статора;

$$\omega = \omega_{1n}(\alpha - \beta) . \tag{2.76}$$

Графік струму намагнічування для ряду частот представлений а рис. 2.12.

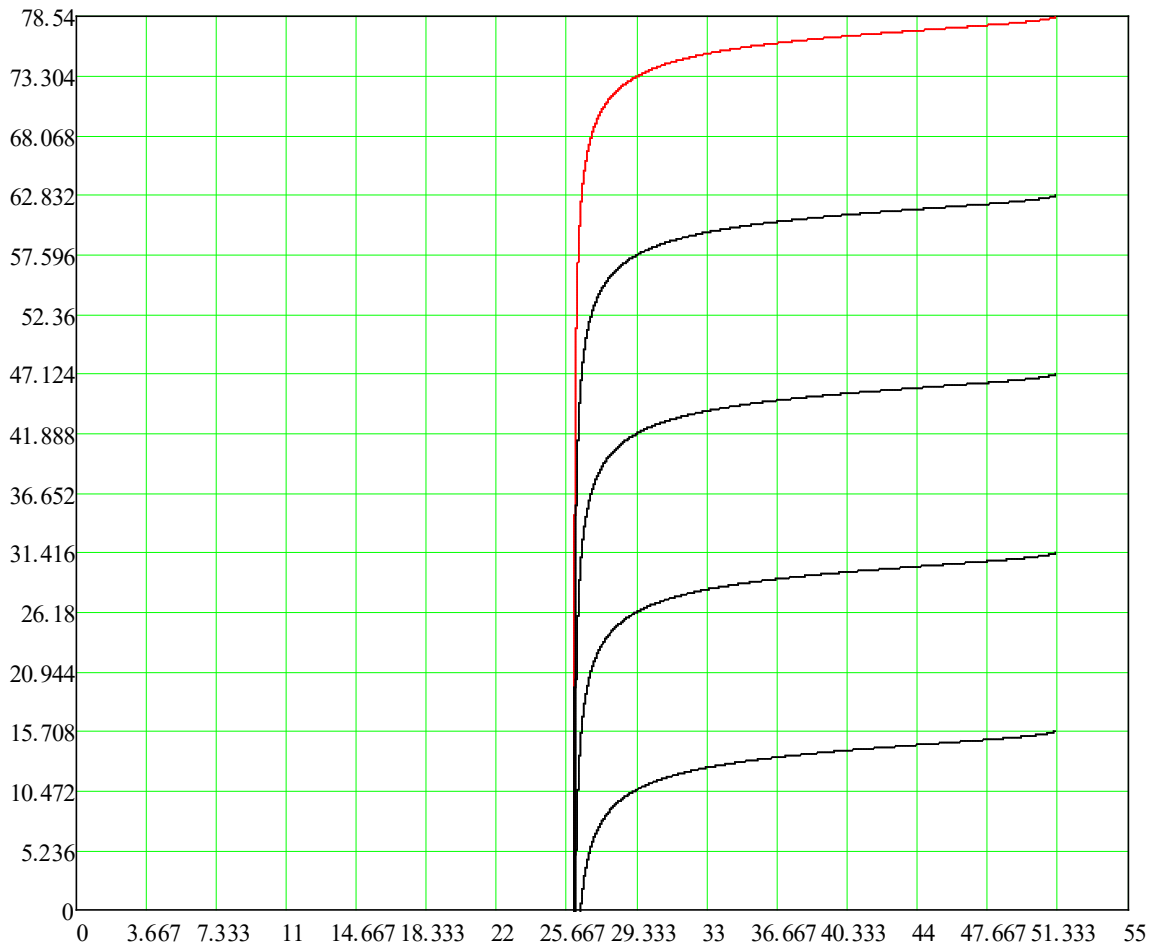


Рисунок 2.12 – Струми намагнічування для ряду частот

З (2.75) очевидно, що режиму короткого замикання відповідає $\beta = \alpha$. Підставляючи це значення β в наведені вище вирази, отримуємо формули для струму статора при короткому замиканні



$$I_{1П\alpha} = U_n \gamma \sqrt{\frac{r_2'^2 / x_0^2 + (1 + \tau_2)^2 \alpha^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \alpha^2 + 2r_1 r_2' \alpha^2 + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2'^2}} \quad (2.76)$$

і моменту (початкового пускового)

$$M_{П\alpha} = \frac{m_1 U_n^2}{\omega_{1н}} \gamma^2 \frac{r_2' \alpha}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \alpha^2 + 2r_1 r_2' \alpha^2 + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2'^2} \quad (2.77)$$

Графік струму статора для ряду частот представлений а рис. 2.13.

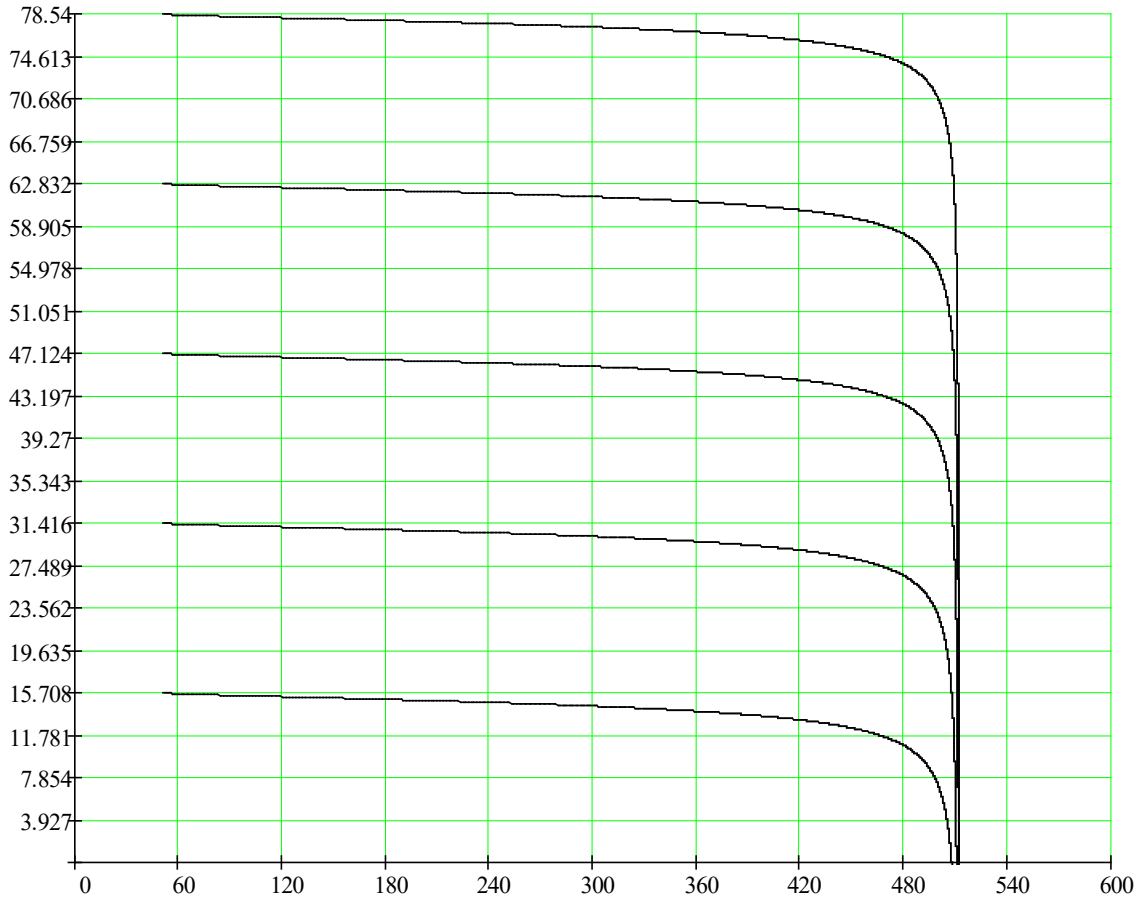


Рисунок 2.13 – Струми статора для ряду частот

Графік струму статора для ряду частот представлений а рис. 2.14.

Струм статора при ідеальному холостому ході

$$I_{10\alpha} = I_{\mu 0\alpha} = \frac{U_n \gamma}{x_0 \sqrt{d^2 + e^2 \alpha^2}} = \frac{U_n \gamma}{\sqrt{r_1^2 + (x_0 + x_2')^2 \alpha^2}} \quad (2.78)$$

Формули частотного управління описують як окремий випадок також і граничний режим цього управління - динамічне гальмування асинхронного двигуна. при $\alpha = 0$ з (2.66) - (2.71) маємо:



$$E_{1(\alpha=0)} = E'_{2(\alpha=0)} = 0 ; \tag{2.79}$$

$$\Phi_{(\alpha=0)} = \frac{U_H \gamma}{r_1 c_1 f_{1H}} \sqrt{\frac{r_2'^2 + x_2'^2 \beta^2}{r_2'^2 / x_0^2 + (1 + \tau_2)^2 \beta^2}} = \frac{U_H \gamma}{r_1 c_1 f_{1H}} \sqrt{\frac{B(\beta)}{C(\beta)}} ; \tag{2.80}$$

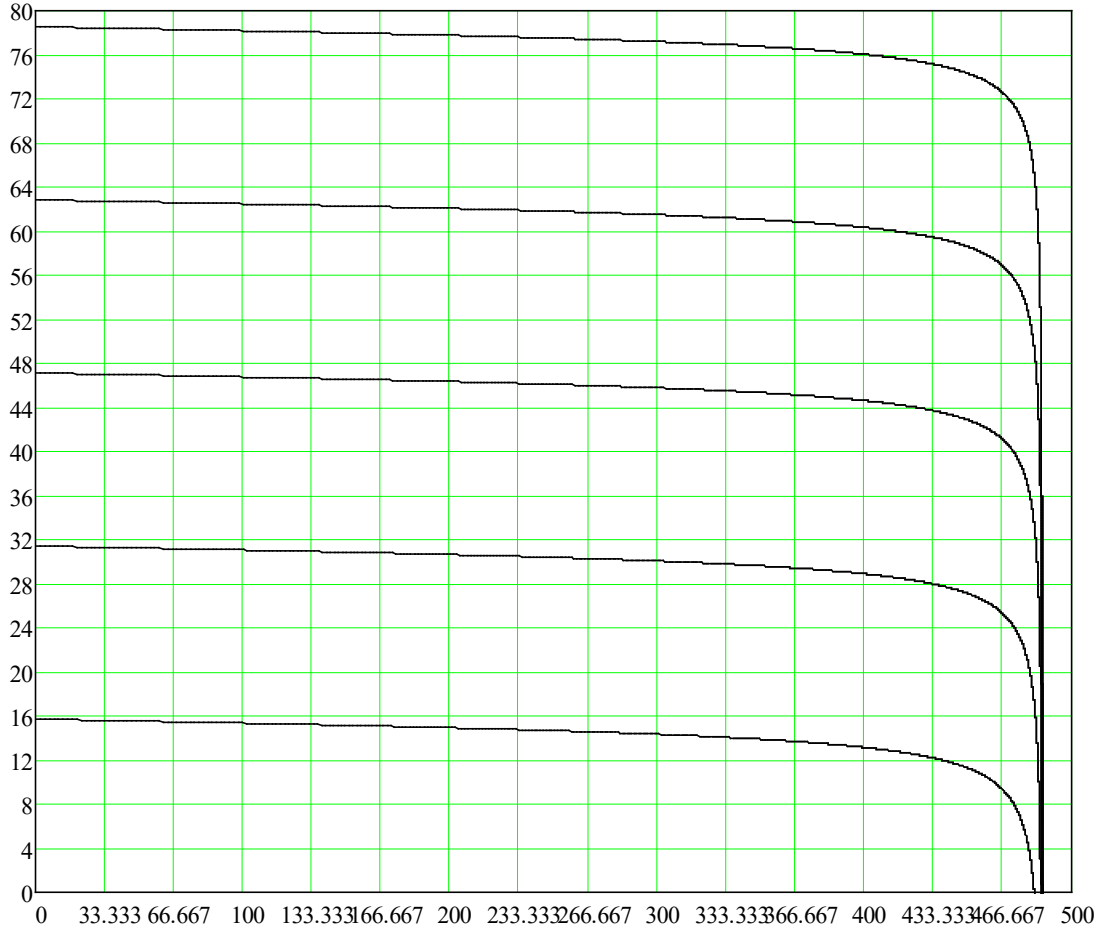


Рисунок 2.14 – Струми ротора для ряду частот

У цих формулах потік Φ_α залежить від частоти і ковзання і визначається (2.67).

Для випадку харчування асинхронного двигуна від джерела струму основні співвідношення зручно представити в наступному вигляді. З (2.68) маємо:

$$U_H \gamma = I_1 \frac{\sqrt{A(\alpha, \beta)}}{\sqrt{C(\beta)}} . \tag{2.81}$$

Підставляючи (2.81) в (2.66), (2.67), (2.59) - (2.71), отримаємо:



$$E_{1\alpha} = E'_{2\alpha} = \alpha I_1 \frac{\sqrt{B(\beta)}}{\sqrt{C(\beta)}}; \quad (2.82)$$

$$\Phi(\beta) = \frac{1}{c_1 f_{1H}} I_1 \frac{\sqrt{B(\beta)}}{\sqrt{C(\beta)}}; \quad (2.83)$$

$$I'_{2}(\beta) = I_1 \frac{\beta}{\sqrt{C(\beta)}}; \quad (2.84)$$

$$I_{\mu}(\beta) = I_1 \frac{\sqrt{D(\beta)}}{\sqrt{C(\beta)}}; \quad (2.85)$$

$$M(\beta) = \frac{m_1 I_1^2 r'_2 \beta}{\omega_{1H} C(\beta)}. \quad (2.56)$$

2.5.3. Визначальними для асинхронної машини є втрати в міді статора і ротора, втрати в сталі статора від гистерезиса і вихрових струмів, а також механічні втрати. Основними втратами в сталі ротора можна знехтувати, так як при абсолютному ковзанні, що не перевищує номінального (що має місце в сталому режимі при частотному управлінні), вони дуже малі.

Крім названих втрат в асинхронній машині ще виникають поверхневі і пульсації втрати в сталі статора і ротора; додаткові втрати головним чином в обмотці ротора і частково в обмотці статора, в сталі і металевих масивних частинах машини, обумовлені струмами, наведеними полями розсіювання і вищими гармоніками потоку. В сумі всі додаткові втрати становлять в середньому 1% споживаної двигуном потужності.

Втрати в міді статора доцільно уявити, як це прийнято, у вигляді суми втрат від струму холостого ходу (намагнічування) і втрат від робочого струму. Перетворюючи (2.68) з урахуванням (2.69) і (2.70), отримаємо вираз для струму статора

$$I_{1\alpha} = \sqrt{(1 + 2\tau_2) I_{2\alpha}^2 + I_{\mu\alpha}^2}. \quad (2.87)$$

Втрати в міді статора

$$\Delta P_{\alpha 1} = 3r_1(1 + 2\tau_2) I_{2\alpha}^2 + 3r_1 I_{\mu\alpha}^2, \quad (2.88)$$



або, висловлюючи відповідні частки втрат через втрати в номінальному режимі, отримуємо:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P'_{\Sigma n} i^2 + \Delta P_{\Sigma.o.n} i_{\mu}^2, \quad (2.89)$$

де $i = I'_{2\alpha} / I'_{2n}$ - відносний наведений струм ротора; $i_{\mu} = I_{\mu\alpha} / I_{\mu n}$ - відносний струм намагнічування; $\Delta P'_{\Sigma n}$, $\Delta P_{\Sigma.o.n}$ - частки втрат у міді статора при номінальному режимі, обумовлені робочим і намагнічує струмами.

На підставі відомих залежностей окремих складових втрат від струму, частоти і потоку, висловлюючи втрати через їх номінальні значення і переходячи до відносним одиницям, електромагнітні втрати асинхронного двигуна можна представити у вигляді

$$\Delta p_{\Sigma} = \rho_1 i^2 + \sigma_1(\alpha) \phi^2 + a_{\Sigma.o} i_{\mu}^2, \quad (2.90)$$

де $\Delta p_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma} / \Delta P_n$ - відносні електромагнітні втрати; $\rho_1 = a_{\Sigma 1} + a_{\Sigma 2}$ - коефіцієнт змінних втрат в міді статора і ротора від струму $I'_{2\alpha}$; $\sigma_1(\alpha) = a_{c.2} a + a_{c.8} a^2$ - коефіцієнт втрат в сталі статора від гистерезиса і вихрових струмів; $a_{\Sigma 1}, a_{\Sigma 2}, a_{\Sigma.o}, a_{c.2}, a_{c.8}$ - коефіцієнти, постійні для даного двигуна і характеризують відносну величину окремих складових номінальних втрат, наприклад $a_{\Sigma 1} = \Delta P'_{\Sigma n} / \Delta P_n$.

значення коефіцієнтів a_i зазвичай лежать в межах $a_{\Sigma 1} \approx 0,28 \div 0,32$; $a_{\Sigma 2} \approx a_{\Sigma 1}$; $a_{\Sigma.o} \approx 0,02 \div 0,06$; $a_{c.2} + a_{c.8} \approx 0,22 \div 0,19$. ставлення коефіцієнтів $a_{c.8} / a_{c.2}$ ($a_{c.8}$ - коефіцієнт втрат в сталі від вихрових струмів, $a_{c.2}$ - від гистерезиса) при номінальній частоті 50 Гц в залежності від товщини листів і марки сталі становить приблизно 0,12-0,6, причому менше значення відноситься до листів з високолегованої сталі товщиною 0,35 мм, і більше - до листів з слаболегірованих сталі товщиною 0,5 мм.

Відповідно до енергетичної діаграмою асинхронного двигуна його електромагнітний к.к.д. можна обчислити за формулою



$$\eta_{эм} = 1 - \frac{p'_н (\rho_1 i^2 + \sigma_1 (\alpha) \phi^2 + a_{э.о} i_\mu^2)}{\mu \frac{\omega}{\omega_n} + p'_н (\rho_1 i^2 + \sigma_1 (\alpha) \phi^2 + a_{э.о} i_\mu^2)} \quad (2.91)$$

де $p'_н = \Delta P'_н / P'_{2н} = \Delta P'_н / M'_н \omega_n$ - повні номінальні втрати в частках від номінальної механічної потужності двигуна $P'_{2н}$; $\mu = M_\alpha / M'_н$ - відносний електромагнітний момент.

При експериментальному визначенні втрат в сталі (наприклад, з досвіду холостого ходу) отримують суму основних, поверхневих і пульсаційних втрат в сталі статора і ротора. Поділ цих втрат на окремі складові досвідченим шляхом дуже важко, а точність розрахунку магнітних втрат невисока (10-15%). Тому доцільно при аналізі к.к.д. в якості вихідної взяти величину повних втрат в сталі при холостому ході або при номінальному режимі і розділити їх тільки на втрати від гистерезиса і вихрових струмів; причому, з огляду на характер залежності окремих складових магнітних втрат, віднести всі пульсації втрати до втрат від вихрових струмів, а всі поверхневі - до втрат від гистерезиса. Додаткові ж втрати (0,5% P1), які можна прийняти пропорційними квадрату струму, віднести до втрат в міді ротора.

При необхідності урахування додаткових втрат, обумовлених вищими гармоніками напруги (струму) в разі живлення двигуна від несинусоїдної формою напруги (струму), ці втрати також можуть бути розподілені. Так, можна показати, що при харчуванні від інвертора напруги основна частина додаткових втрат пропорційна квадрату потоку, але складним чином залежить від частоти, отже ці втрати можна віднести до втрат на збудження; при харчуванні від інвертора струму основна частина додаткових втрат пропорційна квадрату потоку, але складним чином залежить від частоти, отже ці втрати можна віднести до втрат на збудження; при харчуванні від інвертора струму основна частина додаткових втрат пропорційна квадрату робочого струму, тобто може бути віднесена до змінних втрат. З цього випливає, що облік додаткових втрат не змінить структуру формули повних втрат, внісши лише деяку корективу в величину коефіцієнтів, в їх співвідношення. А така як самі додаткові втрати малі



(особливо для інверторів напруги: 5-10% номінальних втрат) і знаходяться в межах точності визначення основних коефіцієнтів основних втрат машини, то в подальшому вони не враховуються.

Механічні втрати залежать від кутової швидкості

$$\Delta P_M = \Delta P_{M.H} (\omega / \omega_n)^n, \quad (2.92)$$

де $n = 1 \div 1,5$.

Чи не вносячи помітної похибки, можна в (2.76) знехтувати ковзанням. тоді

$$\Delta P_M \approx \Delta P_{M.H} (\omega_1 / \omega_{1H})^n = \Delta P_{M.H} \alpha^n, \quad (2.93)$$

де ω_1 - кутова швидкість поля статора.

Відповідно до запропонованого вище розподілом поверхневих, пульсаційних і додаткових втрат повні втрати двигуна запишемо (в відносних одиницях) в такій формі:

$$\Delta p = \rho_2 i^2 + \sigma_2(\alpha) \phi^2 + a_{\text{э.о}} i_\mu^2 + a_M \alpha^n, \quad (2.94)$$

де $\rho_2 = a_{\text{э1}} + a'_{\text{э2}}$ - коефіцієнт змінних втрат з урахуванням додаткових втрат, відрізняється від ρ_1 величиною коефіцієнта $a'_{\text{э2}} \approx 0,33$; $\sigma_2(\alpha) = a'_{\text{с.э}} \alpha + a'_{\text{с.б}} \alpha^2$ - коефіцієнт втрат в сталі. враховує як основні, так і додаткові втрати в сталі; $a_M = \Delta P_{M.H} / \Delta P_H = 0,09 \div 0,06$ - коефіцієнт механічних втрат.

Механічний ККД можна обчислити за формулою

$$\eta = 1 - \frac{p'_H (\rho_2 i^2 + \sigma_2(\alpha) \phi^2 + a_{\text{э.о}} i_\mu^2 + a_M \alpha^n)}{\mu_\text{э} \omega / \omega_n + p'_H (\rho_2 i^2 + \sigma_2(\alpha) \phi^2 + a_{\text{э.о}} i_\mu^2 + a_M \alpha^n)}, \quad (2.95)$$

або

$$\eta = 1 - \frac{p'_H (\rho_2 i^2 + \sigma_2(\alpha) \phi^2 + a_{\text{э.о}} i_\mu^2 + a_M \alpha^n)}{\mu_\text{э} \omega / \omega_n + p'_H (\rho_1 i^2 + \sigma_1(\alpha) \phi^2 + a_{\text{э.о}} i_\mu^2)}, \quad (2.96)$$

де $\mu_\text{э} = M_\text{э} / M_H$ - відносний момент на валу, він пов'язаний з електромагнітним моментом відомим співвідношенням

$$\mu = \mu_\text{э} + \mu_0, \quad (2.97)$$



тут μ_0 - відносний момент втрат, що враховує механічні та додаткові втрати.

Графік ККД для ряду частот представлений на рис. 2.15.

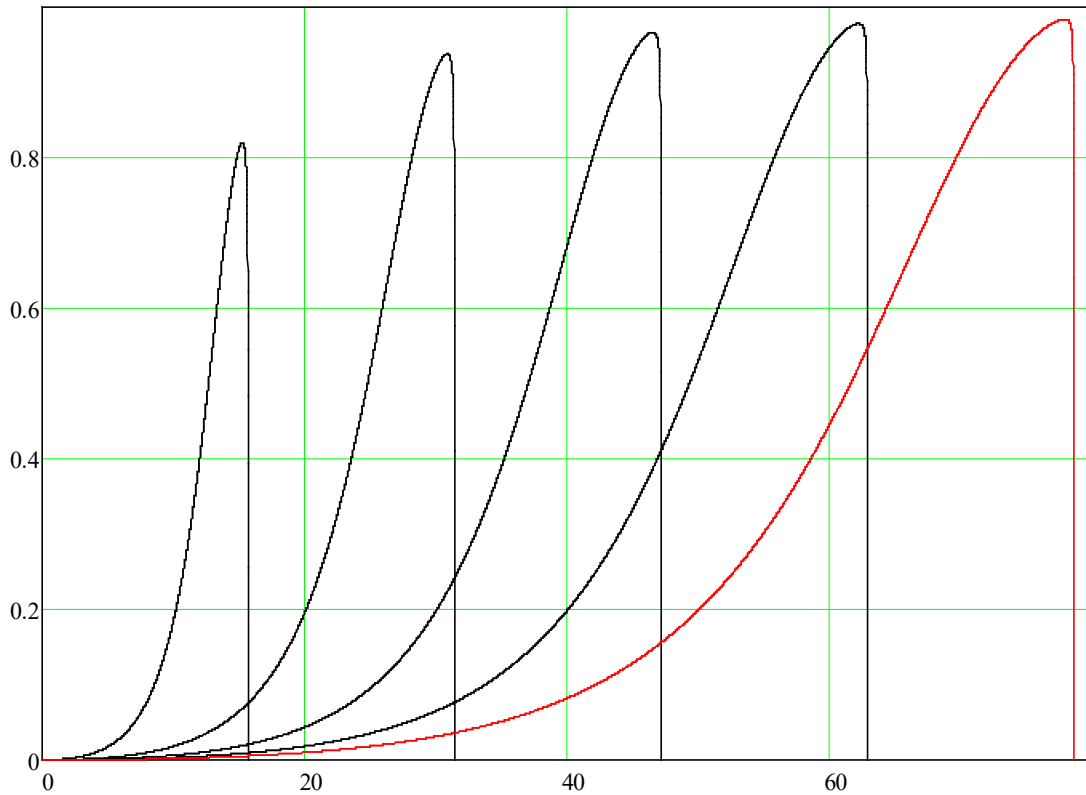


Рисунок 2.15 - Графік ККД для ряду частот

2.6. Розрахунок енергетичних характеристик електроприводу

$$\cos \phi_{1\alpha} = \frac{P_1}{S_1} = \frac{M_n \omega_n (\mu_0 \omega / \omega_n) + p'_n (\rho_2 i^2 + \sigma_2(\alpha) \phi^2 + a_{\text{э.о}} i_\mu^2 + a_m \alpha^n)}{m_1 I_{1n} U_n \gamma \frac{\sqrt{(1+2\tau_2) i^2 + k_\mu^2 i_\mu^2}}{\sqrt{(1+2\tau_2) + k_\mu^2}}}, \quad (2.98)$$

або

$$\cos \phi_{1\alpha} = \frac{M_n \omega_n}{m_1 I_{1n} U_n} \frac{\mu \omega / \omega_n + p'_n (\rho_1 i^2 + \sigma_1(\alpha) \phi^2 + a_{\text{э.о}} i_\mu^2)}{\gamma \sqrt{(1+2\tau_2) i^2 + k_\mu^2 i_\mu^2}} \sqrt{(1+2\tau_2) + k_\mu^2}, \quad (2.99)$$

де $k_\mu = I_{\mu n} / I'_{2n} \approx 0,26 \div 0,6$.

На підставі схеми заміщення (рис. 2.16) отримаємо таку залежність $\cos \phi_{1\alpha}$



від α і β :

$$\cos \phi_{1\alpha} \approx \frac{r_1 C(\beta) + \alpha r_2 \beta}{\sqrt{A(\alpha, \beta)} \sqrt{C(\beta)}}, \quad (2.100)$$

де $A(\alpha, \beta)$ і $C(\beta)$ визначаються (2.72) і (2.74).

Формула (2.99) є наближеною, оскільки не враховує втрати в сталі. Графіки залежності коефіцієнта потужності двигуна від ковзання для ряду частот представлені на рис. 2.16

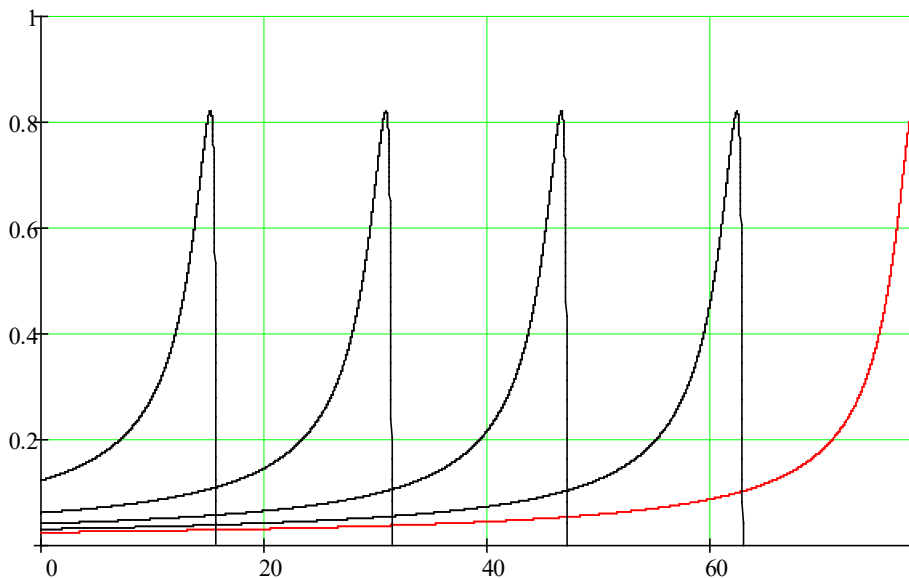


Рисунок 2.16 – Залежність коефіцієнту потужності двигуна від ковзання для ряду частот

2.7. Розробка математичної моделі електроприводу

Асинхронний двигун моделюють як систему магнітозв'язаних обмоток, розташованих на статорі і роторі (рис.2.17). При складанні рівнянь електричної рівноваги АД, для спрощення його моделювання, використовуються такі припущення, пов'язані з поняттям ідеалізованої машини,:

- сталь машини ненасичена;
- фазні обмотки симетричні і зсунуті в просторі на 120°;
- МРС обмоток і магнітних полів розподілені синусоїдально уздовж



повітряного зазору;

- ротор електрично та магнітно симетричний;
- реально розподілені обмотки АД замінюються зосередженими, а МРС прийнята рівною МРС реальної обмотки.

Система рівнянь електричної рівноваги контурів для статора і ротора буде мати вигляд (2.101) - (2.102).

$$\begin{cases} U_A = i_A R_s + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ U_B = i_B R_s + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ U_C = i_C R_s + \frac{d\psi_C}{dt}. \end{cases} \quad (2.101)$$

$$\begin{cases} 0 = i_a R_r + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ 0 = i_b R_r + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ 0 = i_c R_r + \frac{d\psi_c}{dt}, \end{cases} \quad (2.102)$$

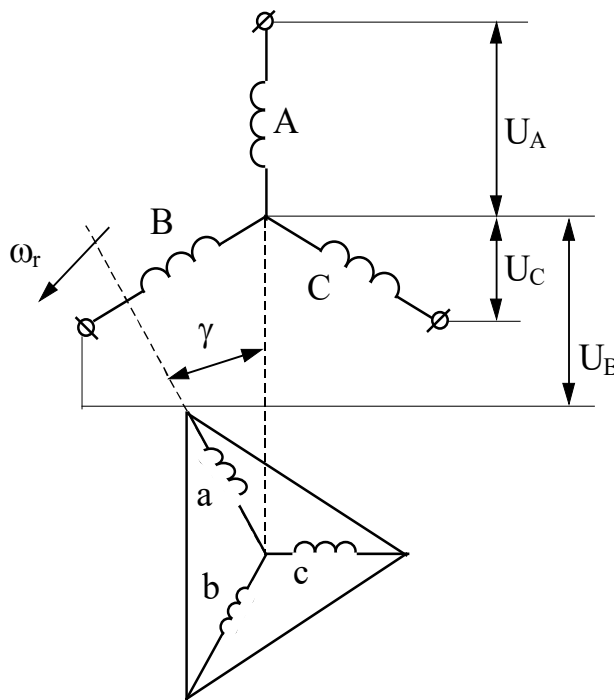


Рисунок 2.17 – Схема з'єднання обмоток статора і ротора

де ψ_A, ψ_B, ψ_C - потокозчеплення фаз статора;



Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c - потокозчеплення фаз ротора;

R_s, R_r - активні опори фаз статора і ротора.

Потокозчеплення будь фази АД визначається величиною власної індуктивності обмотки і взаємної індуктивності з усіма іншими обмотками.

Наприклад, для фази "А"

$$\Psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Aa} i_a + M_{Ab} i_b + M_{Ac} i_c, \quad (2.103)$$

де L_A - індуктивність фази;

M_{xy} - взаємоіндуктивності між обмотками x і y .

Виходячи з прийнятих припущень про симетричність електричної машини взаємні індуктивності між обмотками статора і ротора:

$$M_{AB} = M_{AC} = M_{BC} = M_s; \quad (2.104)$$

$$M_{ab} = M_{ac} = M_{bc} = M_r. \quad (2.105)$$

Найбільш складними моментами при моделюванні є те, що взаємне просторове розташування обмоток ротора і статора змінюється, в результаті чого змінюється і величина взаємної індуктивності між цими обмотками.

Максимальне значення взаємної індуктивності відповідає збігу осей двох фаз. При перпендикулярному розташуванні осей M вона дорівнює нулю. Тому взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора буде змінюватися по гармонійному закону.

Для фази "А"

$$M_{Aa} = M \cos \gamma, \quad (2.106)$$

де M - максимальна величина взаємної індуктивності; γ - кут повороту ротора.

Фаза "В" випереджає "А" на 120°

$$M_{Ab} = M \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right), \quad (2.107)$$

тоді аналогічно для фази "С"

$$M_{Ac} = M \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right). \quad (2.108)$$



Аналогічно для фаз "В" і "С"

$$\begin{cases} M_{Ba} = M \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right), \\ M_{Bb} = M \cos \gamma, \\ M_{Bc} = M \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right); \end{cases} \quad (2.109)$$

$$\begin{cases} M_{Ca} = M \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right), \\ M_{Cb} = M \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right), \\ M_{Cc} = M \cos \gamma. \end{cases} \quad (2.110)$$

Тепер рівняння потокозчеплення фази в розгорнутому вигляді:

$$\begin{aligned} \psi_A = L_A i_A + M_s i_B + M_s i_C + M i_a \cos \gamma + \\ + M i_b \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + M i_c \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (2.111)$$

З урахуванням $i_A + i_B + i_C = 0$ то $-i_A = i_B + i_C$:

$$\psi_A = (L_s - M_s) i_A + M i_a \cos \gamma + M i_b \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + M i_c \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \quad (2.112)$$

Тепер рівняння електричної рівноваги:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_A}{dt} = (L_s - M_s) \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_a}{dt} \cos \gamma - M \omega i_a \sin \gamma + \\ + M \frac{di_b}{dt} \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) - M \omega i_b \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ + M \frac{di_c}{dt} \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) - M \omega i_c \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (2.113)$$

Звідки



$$\begin{aligned}
 & U - i_A R_s + M \omega i_a \sin \gamma + M \omega i_b \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + M \omega i_c \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) = \\
 & = (L_s - M_s) \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_a}{dt} \cos \gamma + M \frac{di_b}{dt} \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + \\
 & + M \frac{di_c}{dt} \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right).
 \end{aligned} \tag{2.114}$$

Аналогічно складаються ще два рівняння для фаз "В" і "С" статора і три - для всіх фаз ротора.

Рівняння електромагнітного моменту

$$M = \frac{P}{\sqrt{3}} [(\Psi_C - \Psi_B) I_A + (\Psi_A - \Psi_C) I_B + (\Psi_B - \Psi_A) I_C],$$

або щодо струмів

$$\begin{aligned}
 M & = pL_\mu (I_A I_a + I_B I_b + I_C I_c) \sin(\phi) + \\
 & + (I_A I_b + I_B I_c + I_C I_a) \sin \left(\phi + \frac{2\pi}{3} \right) + \\
 & (I_A I_c + I_B I_a + I_C I_b) \sin \left(\phi - \frac{2\pi}{3} \right).
 \end{aligned}$$

рівняння руху

$$J \frac{d\omega}{dt} M - M_c$$

При цьому в системі рівнянь АД будуть відсутні потокозчелення, а як невідомі функції використовуються струми. Тому ця система називається системою рівнянь щодо струмів.

2.8. Розрахунок динамічних режимів в розімкнутій системі електроприводу

Розрахунок перехідних процесів електроприводу роторного колеса по системі ПЧ-АД виконаний із застосуванням програмного пакету MATLAB при використанні вбудованих моделей АД і ПЧ. На рис. 2.18, 2.19 наведені математична модель асинхронного електроприводу за системою ПЧ-АД з



автономним інвертором напруги з ШІМ і математична модель автономного інвертора напруги з ШІМ.

Нижче наведені діаграми зміни координат електроприводу для наступних умов: пуск електроприводу на холостому ході і накинув навантаження до номінального значення, пуск електроприводу від ПЧ з плавним підвищенням частоти.

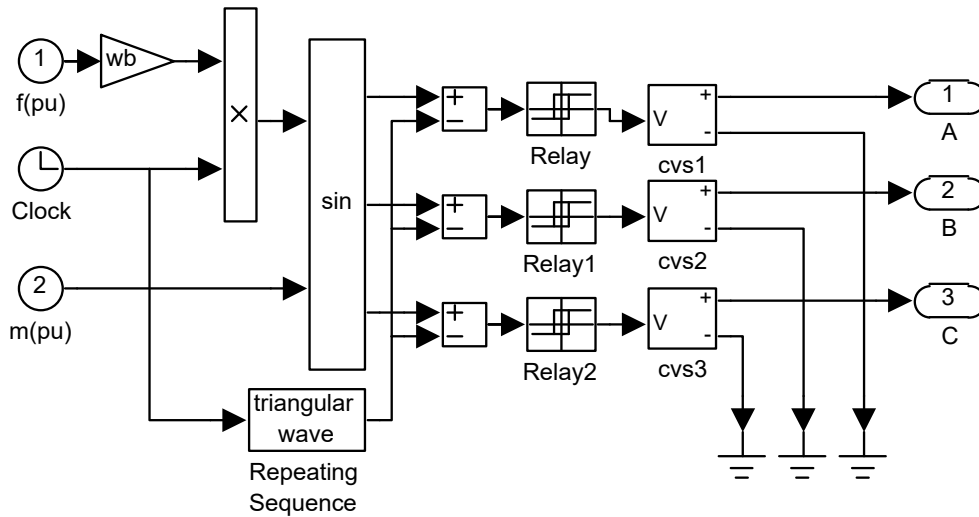


Рисунок 2.18 – Математична модель автономного інвертором напруги з ШІМ

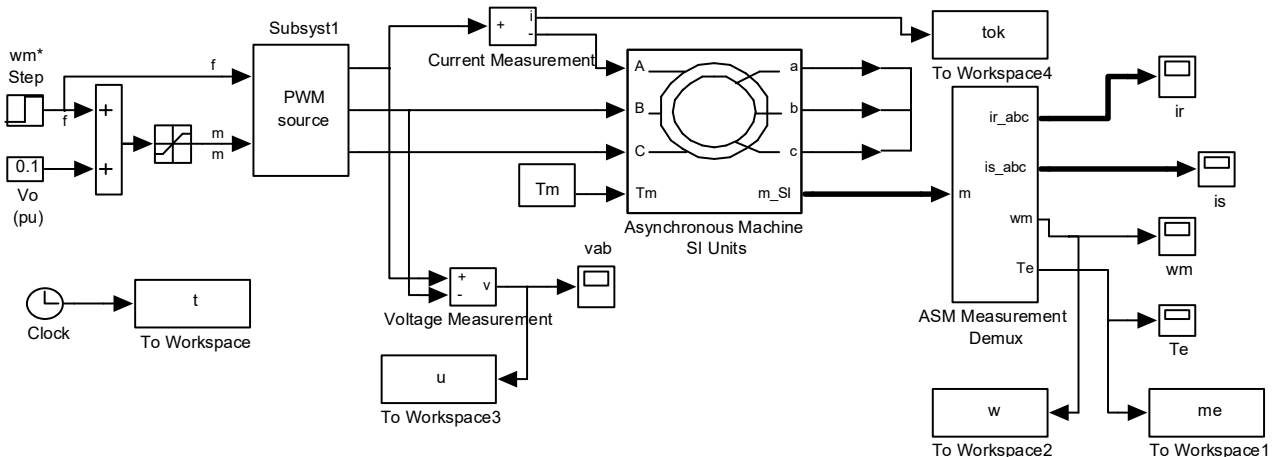


Рисунок 2.19 – Математична модель асинхронного електроприводу за системою ПЧ-АД з автономним інвертором напруги з ШІМ

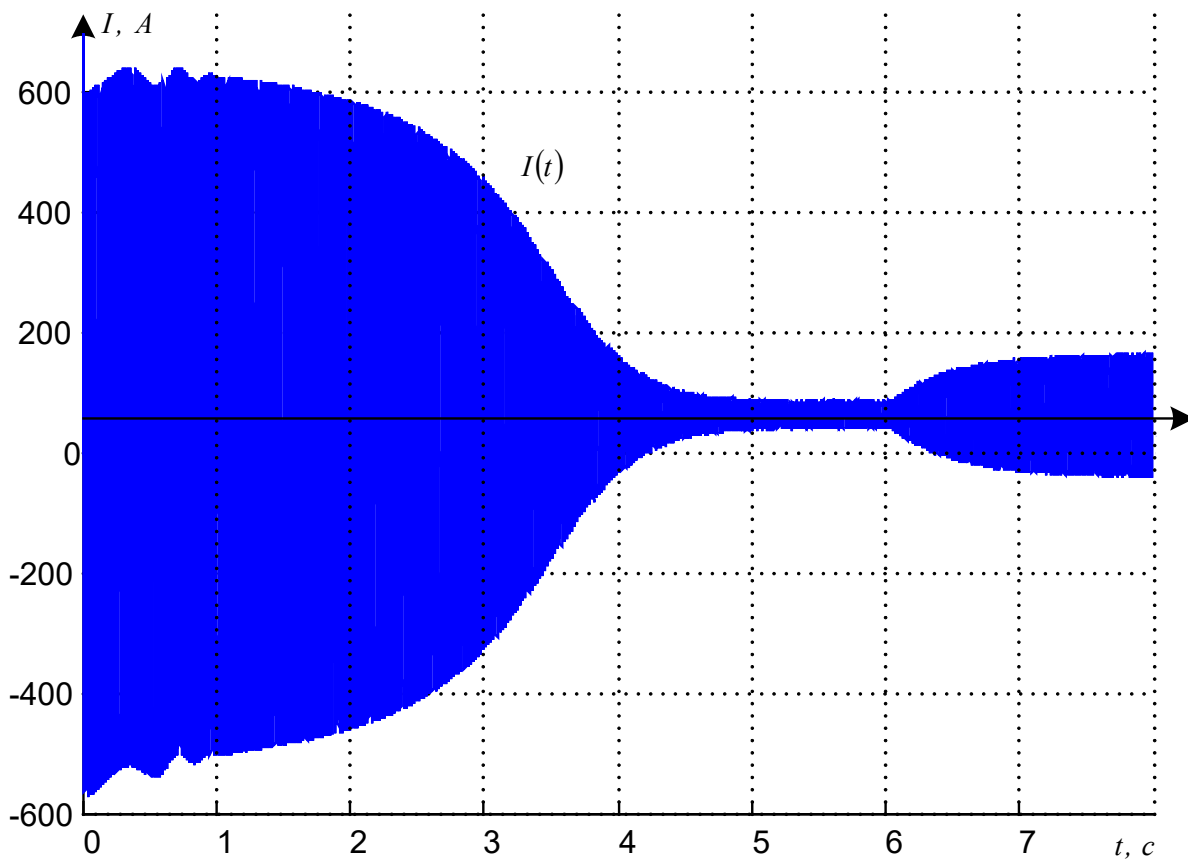


Рисунок 2.20 – Струм фази статора при прямому пуску АД4

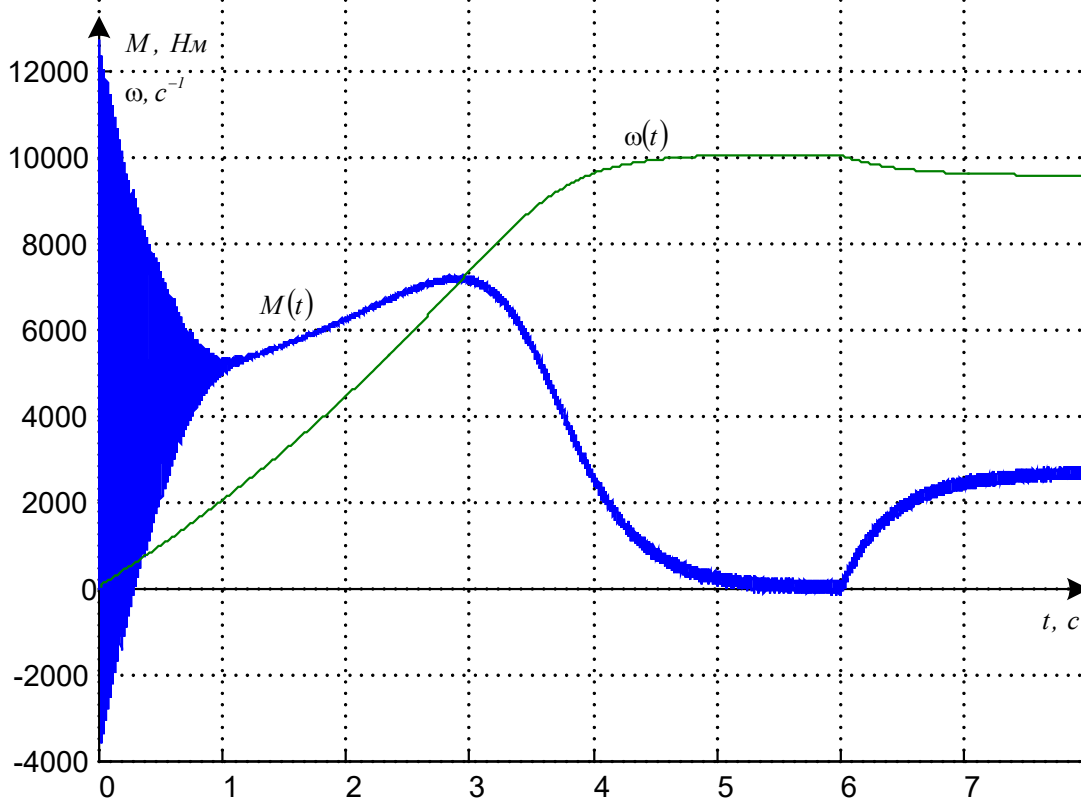


Рисунок 2.21 – Електромагнітний момент і частота обертання при прямому пуску АД (масштаб частоти обертання 400: 1)

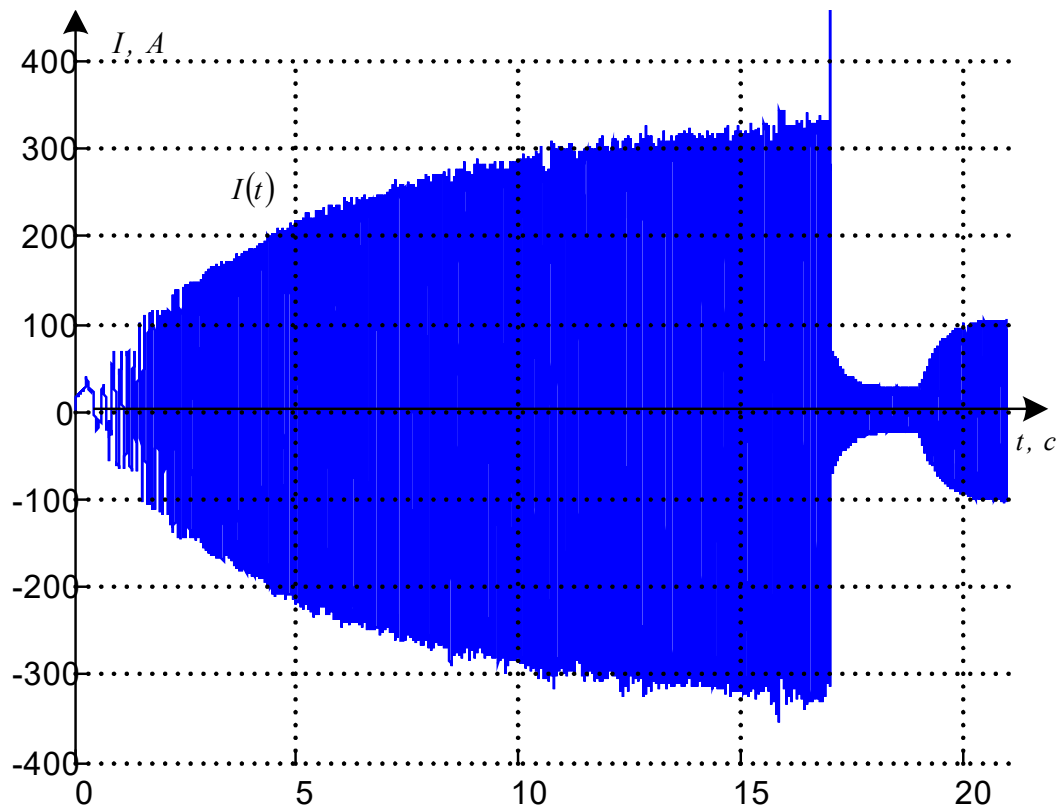


Рисунок 2.22 – Струм фази статора при плавному пуску від ПЧ

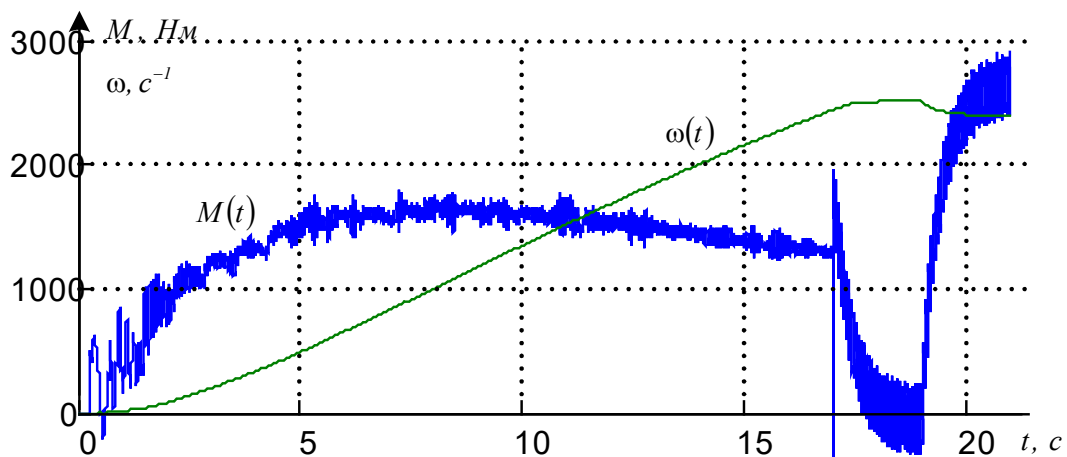


Рисунок 2.23 – Електромагнітний момент і частота обертання АД при плавному пуску від ПЧ. (Масштаб частоти обертання 100: 1)

При виконанні різання на уступі момент опору на валу змінюється за гармонійним законом внаслідок того, що ковші колеса по черзі починають різати ґрунт (рис. 2.24).

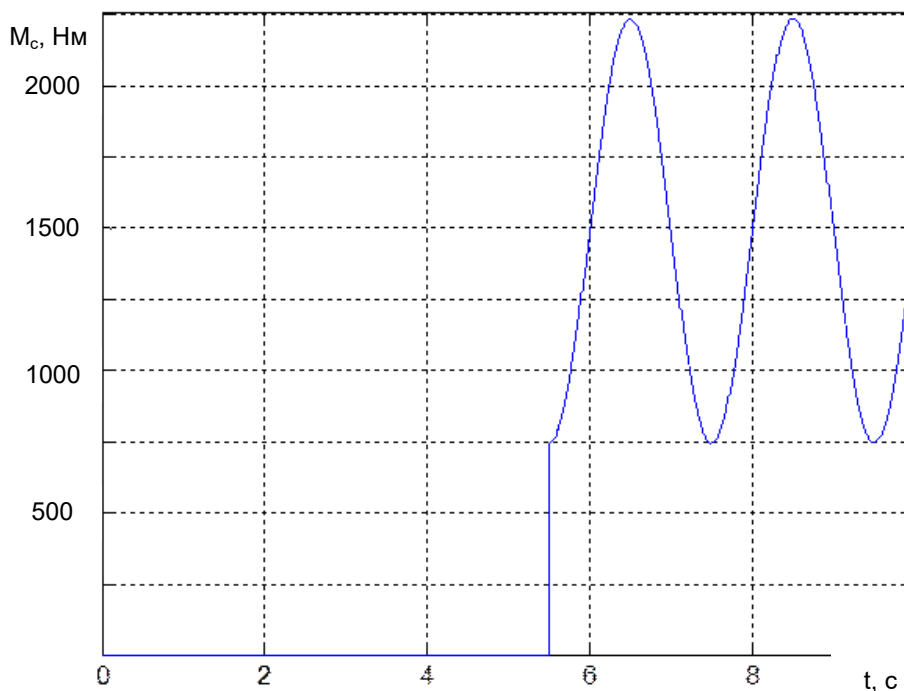
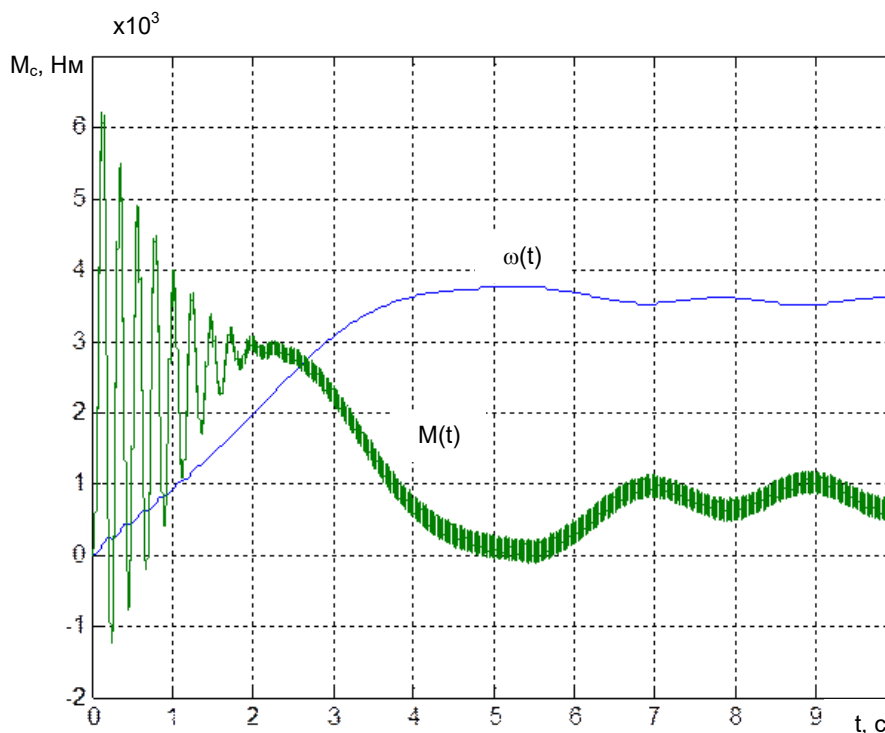


Рисунок 2.24 – Момент опору на валу АД при різанні породи

У модель системи електроприводу, (рис. 2.16) доданий момент опору різання

$$M_c = M_{c0} + M_{cv} = M_{c0} + M_{c1} \sin(vt),$$

де M_{c0} , M_{cv} - постійна і змінна складова моменту опору, M_{c1} , v - амплітуда і частота змінної складової моменту опору.



**Рисунок 2.25 – Момент і частота обертання при різанні
(Масштаб швидкості 20: 1)**

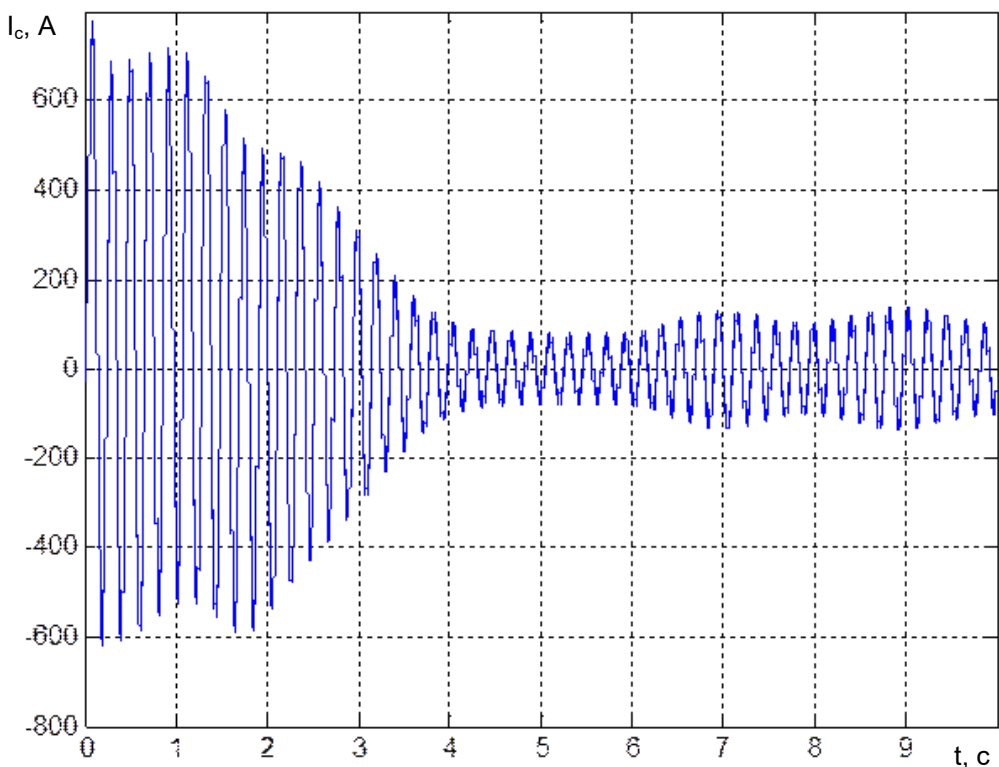


Рисунок 2.26 – Струм статора АД при різанні

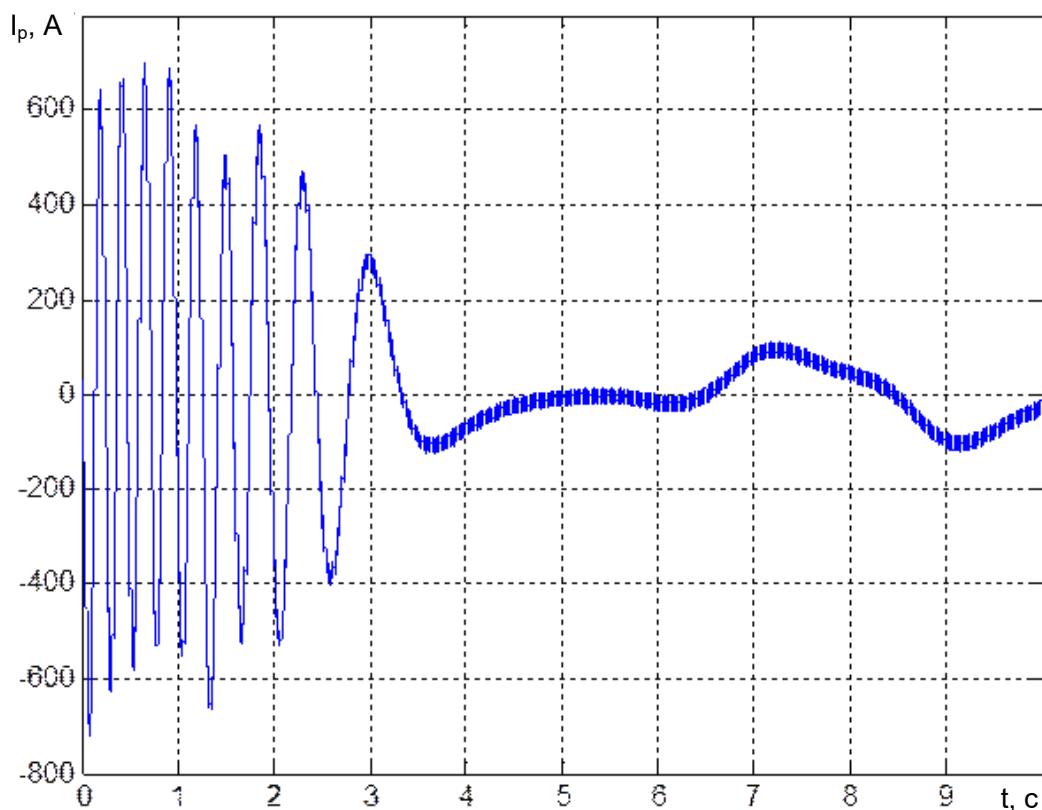


Рисунок 2.27 – Струм ротора АД при різанні



2.9. Розрахунок динамічних режимів в замкнутій системі електроприводу

Основним завданням системи автоматичного регулювання є швидкість обертання приводного двигуна і забезпечення обмеження моменту (струму) при перевантаженнях і в динамічних режимах.

Система регулювання кутової швидкості призначена для стабілізації із заданою точністю кутової швидкості електроприводу і пов'язаного з ним робочого механізму при дії на систему різного роду збурень. Одним з основних збурюючих впливів, вплив якого має бути скомпенсовано системою, є момент статичного опору на валу двигуна M_c , значення якого залежить від типу і властивостей робочого механізму.

В одноконтурних системах управління зазвичай застосовуються такі зворотні зв'язки:

- негативна по швидкості;
- негативна або позитивна за струмом;

Керуючий вплив формується в результаті порівнянні істинного значення керованої координати з запропонованої в регуляторах, на вхід яких надходить напруга, пропорційна завданням, і напруга зворотного зв'язку, пропорційно контрольованій величині.

Вихідні значення контрольованого або керованого параметра вимірюються і перетворюються в пропорційні електричні сигнали за допомогою датчиків і перетворювальних пристроїв.

Недоліком одноконтурних систем регулювання є неможливість обмеження на допустимому рівні струму (моменту) двигуна, що може привести до виникнення аварійних ситуацій.

Дану задачу можуть вирішити багатоконтурні системи, які умовно можна класифікувати за способом включення коригувальних пристроїв:

- з паралельною корекцією (системи із загальним суматором);
- з послідовною корекцією (системи підпорядкованого регулювання);
- зі змішаною корекцією.



На відміну від замкнутої системи з сумуючим підсилювачем, де регулювання декількох координат здійснюється шляхом подання відповідної кількості сигналів зворотних зв'язків на вхід одного, загального для всіх підсумовує підсилювача, принцип підлеглого регулювання передбачає регулювання кожної координати окремо.

При побудові систем підпорядкованого регулювання (СПР) об'єкт регулювання системи розбивається на ряд послідовно з'єднаних динамічних ланок, число яких дорівнює числу регульованих параметрів або числу контурів регулювання. На кожен контур надходить вхідний вплив, які має бути бажаним чином відпрацьовано цим контуром, що представляють по своїй суті звичайну одноконтурну систему регулювання.

Налаштування багатоконтурною СПР (розрахунок і вибір елементів послідовних коригувальних ланцюгів, тобто вибір типу регулятора і розрахунок його параметрів) досягається послідовною оптимізацією контурів системи починаючи з внутрішнього і закінчуючи зовнішнім. Під оптимізацією розуміють таку настройку контуру, яка найкращим чином відповідає поставленим вимогам. Основна вимога до динаміки системи - відхилення регульованої величини від заданого значення повинні усуватися регулятором за найкоротший час і з мінімальним перерегулюванням. У реальних системах ці дві вимоги зазвичай вступають в протиріччя.

Широке поширення в практиці отримали класичні настройки СПР на модульний (МО) і симетричний (СО) оптимум.

Під час прийому модульний оптимум відповідний вибір коефіцієнтів регулятора призводить до того, що розглянутий контур описується функцією передачі коливальної ланки, з коефіцієнтом демпфірування $\xi = \sqrt{2} / 2$:

$$W_s(s) = \frac{1 / k_{oc}}{2T_\mu s (T_\mu s + 1) + 1} = \frac{1 / k_{oc}}{2T_\mu^2 s^2 + 2T_\mu s + 1}.$$

Причому поведінка замкнутого оптимізованого контура визначається тільки малою постійною часу T_μ . (Сума некомпенсованих постійних часу тиристорного перетворювача, фільтрів датчиків і т.п.).



Якщо постійна часу об'єкта регулювання, що підлягає компенсації співставна з малою некомпенсованою постійною часу, а також для підвищення порядку астатизму системи доцільно використовувати налаштування на симетричний оптимум (СО), що приводить до введення в регулятор додаткової інтегральною складовою. Така система має астатизмом другого порядку по задає впливу і астатизмом першого порядку по впливі, що обурює.

Розрахуємо параметри регуляторів. Структурна схема контуру постійного струму представлена на рис. 2.28.

Передавальна функція розімкнутого контуру струму:

$$W_{дт}(p) = \frac{K_{п} K_{дт} / R_e}{(T_e p + 1)(T_{\mu T} p + 1)} \cdot R_T(p) \tag{1.115}$$

Таблиця 2.4 – Якісні показники перехідних процесів

Параметри	МО	СО	СО з фільтром
Перерегулювання $\sigma, \%$	4.3	43	8.1
Час першого узгодження $t_{п}$	$4.7 T_{\mu c}$	$3.1 T_{\mu c}$	$7.6 T_{\mu c}$
Час регулювання $t_{р}$	$8.4 T_{\mu c}$	$16.5 T_{\mu c}$	$13.6 T_{\mu c}$

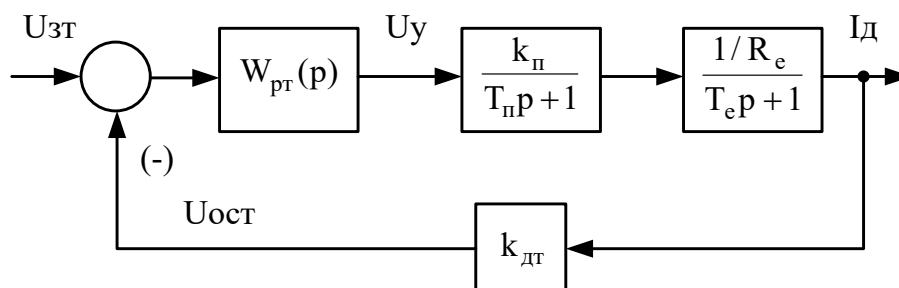


Рисунок 2.28 – Структурна схема контуру струму

Бажана передавальна функція розімкнутого контуру налаштованого на модульний оптимум:

$$W_{жт}(p) = \frac{1}{2T_{\mu T} p (T_{\mu T} p + 1)}$$

Коефіцієнт передачі перетворювача:



$$k_n = \frac{U_\phi}{U_y} = \frac{380}{10} = 38$$

Постійну часу перетворювача приймемо $T_{\text{п}} = 0,003$ с.

Передавальна функція регулятора струму:

$$R_m(p) = \frac{W_{\text{ЖТ}}(p)}{W_{\text{ДТ}}(p)} = K_{\text{рм}} + \frac{1}{T_{\text{рм}}p}$$

В цьому випадку передавальна функція замкнутого оптимізованого контура струму набуде вигляду:

$$W_3(p) = \frac{1 / K_{\text{ДТ}}}{2T_{\mu\Gamma}^2 p + 2T_{\mu\Gamma} p + 1},$$

що відповідає налаштуванню на модульний оптимум.

Для оптимізації контура швидкості представимо у вигляді:

$$W_m^{mo}(p) \approx \frac{1 / K_{\text{ДТ}}}{2T_{\mu\Gamma} p + 1}$$

Структурна схема контуру швидкості представлена на рис. 2.29.

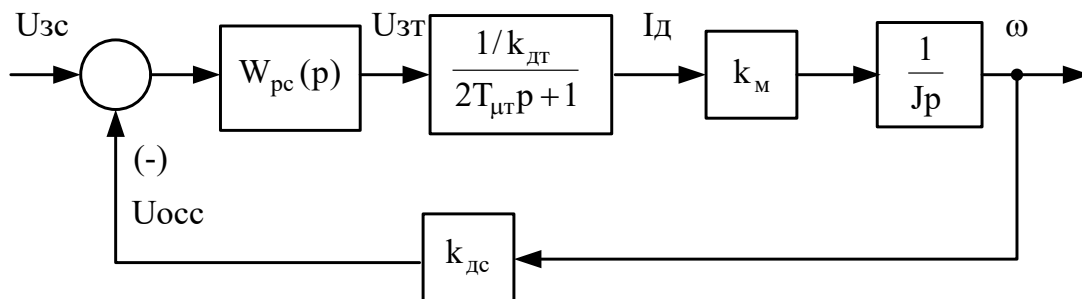


Рисунок 2.29 – Структурна схема контуру швидкості

Аналогічно як і контур струму, розраховується контур швидкості.

Передавальна функція пропорційного регулятора швидкості буде мати вигляд:

$$W_{\text{pc}}(p) = \frac{Jk_{\text{ом}}}{2T_{\mu\text{с}} k_{\text{м}} k_{\text{ос}}} = K_{\text{pc}}$$

За отриманими даними будемо структурну схему системи (рис. 2.30).

На рис. 2.31 представлені результати математичного моделювання системи.

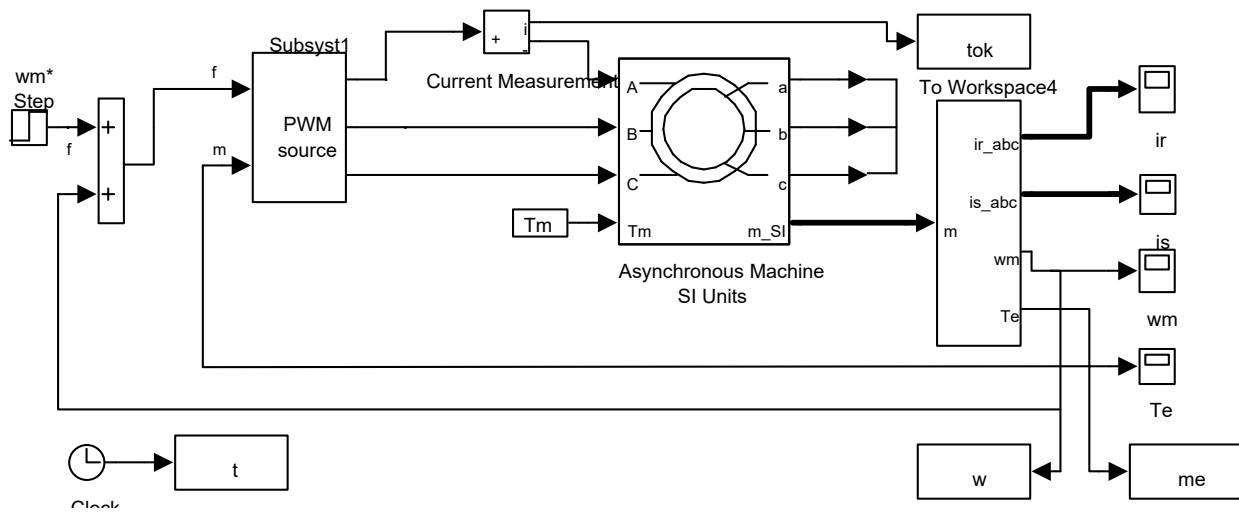


Рисунок 2.30 – Модель замкнутої системи електроприводу з урахуванням моменту опору різання

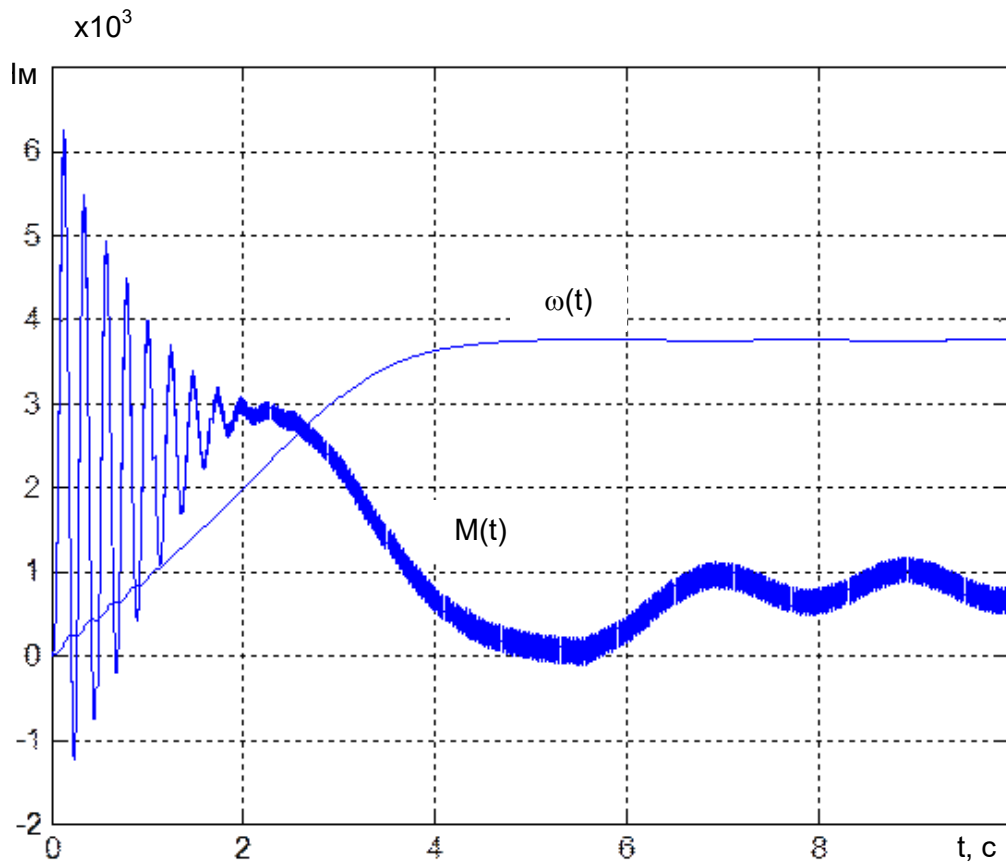


Рисунок 2.31 - Момент і частота обертання при різанні (Масштаб швидкості 20: 1)



2.10. Висновки до розділу

Перспективним напрямком в удосконаленні та розвитку приводу роторних екскаваторів є застосування об'ємного гідроприводу. Як показує закордонна практика, об'ємний гідропривід починає успішно використовуватися на основних силових механізмах роторних екскаваторів.

У порівнянні з електромеханічним приводом, гідропривід ротора на базі високомоментних гидромоторів має:

- невелику масу і махового моменту;
- хороші демпфуючі властивості при постійному моменті;
- плавне регулювання швидкості в широких межах;

надійний захист ротора і в цілому екскаватора від перевантажень в стопорних режимах, можливість запуску під навантаженням.

Аналіз статичних характеристик дозволяє зробити висновок, що за показниками статизму двигуна характеристик, значенням пускового і максимального моменту АД спроможний забезпечувати обертання роторного колеса.

Прийнята система ПЧ-АД з пропорційним законом керування забезпечує необхідний діапазон регулювання частоти обертання колеса згідно з параметрами технологічного процесу.

Як видно з характеристик, застосування замкнутої системи підпорядкованого регулювання дозволяє обмежити максимально допустимий момент двигуна (на рівні, що не перевищує критичне значення) і стабілізувати кутову швидкість обертання двигуна, а, отже, і швидкість обертання робочого органу.



Schlussfolgerungen / Conclusions

Наведено технічні характеристики електроприводу роторного колеса роторного екскаватора ЕРШР-1600 і приводного двигуна АД типу ВАСО 2-75-24У1. Проаналізовано теоретичні відомості про математичні моделі основних елементів електромеханічної системи: асинхронного двигуна, математичну модель перетворювача частоти. Враховуючи, що параметри АД симетричні, а ПЧ є стандартним зі скалярним керуванням то моделювання може бути здійснене із застосуванням спеціалізованих програмних засобів і стандартних програм. Модель може бути складена в ортогональній системі координат з використанням блоку перетворення змінних стану в фазні величини. Розраховані схема заміщення АД і параметри моделей.

У програмі Matlab / Simulink та основі бібліотечної моделі ПЧ-АД створена структурна схема моделі електромеханічної системи з урахуванням реактивної характеристики моменту опору і наявності перетворювача частоти для керування швидкістю електроприводу. На отриманій математичній моделі розраховані часові діаграми типових динамічних режимів електроприводу при запуску і регулювання швидкості руху.

Синтезована двоконтурна система підпорядкованого керування з ПІ-регулятором струму і ПІ-регулятором швидкості, яка забезпечує стабілізацію коливань частоти обертання при різанні породи.



Verweise / References

1. Домбровський Н.Г. Багатоковшеві екскаватори - М .: «Машинобудування», 1972. - 432 с.
2. German Approach to Mass Excavation. - «Engineering», 1964, N 12.
3. Wheel excavator loading ont 1,000 tons per hour in semi-hard brown T thale. - «Earthmoving and Construction», 1965, N 10.
4. Подерні Р.Ю. Механічне обладнання кар'єрів: Підручник для вузів. - 6-е изд., Перераб. і доп.- М .: Изд-во МДГУ, 2007. - 680с.
5. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. – Д. : Донбас, 2007. – Т.2: Л – Р. – 670 с. – ISBN 57740-0828-2.
6. Земляний А. О. Багатодвигунний електропривод драглайна : дис. – КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021.
7. Павленко Т. П., Донець О. В., Петренко О. М. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів //Харків: ХНУМГ ім. ОМ Бекетова. – 2018.
8. Донець О. В., Колотіло В. І. Теорія електропривода: конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка). – 2021.
9. Чермалих О. В. и др. Автоматизований електропривод машин та установок. – 2021.
10. Щербина О. Проблеми економії енергоресурсів в Україні. /Щербина О. // Ринок інсталяцій, травень, 2002, С. 7-8.
11. Михайлюта С.Л., Биков В.І., Михайлюта Г.С.Регульований електропривід як засіб підвищення ефективності виробництва // Вісник інженерної академії України. – № 2, 2010. – С. 267-271.
12. ДСП 173-96. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. № 379/1404.
13. ДСН 3.36.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – К.: Держстандарт, 1999. – 31 с.



14. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвучу та інфразвучу. – К.: Держстандарт, 1999.
15. ДБН В.2.5-28-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. – К.: Мінбуд України, 2006.
16. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ-2009. – Х.: Форт, 2009.
17. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – К.: Укр. НДПБ, 2007.
18. ДБН В.1.1.7-2002. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. – К.: Держбуд України, 2003.
19. НАПБ Б.03.001-2004. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників. К.: МНС України, 2004.



SCIENTIFIC EDITION

**MONOGRAPH
DER STAND DER ENTWICKLUNG VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK
IM XXI JAHRHUNDERT**

**SYNTHESE DES SYSTEMS ZUR STABILISIERUNG DER DREHFREQUENZ DES
ASYNCHRONMOTORS DES ELEKTRISCHEN ANTRIEBS DES ROTORRADS DES
BAGGERS ERSHR-1600 DES POKROVSKY-STEINBRUCHS**

*THE LEVEL OF DEVELOPMENT OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
IN THE XXI CENTURY*

SYNTHESIS OF THE SYSTEM OF STABILIZATION OF THE ROTATION FREQUENCY OF
THE ASYNCHRONOUS MOTOR OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE ROTOR WHEEL OF
THE EXCAVATOR ERSHR-1600 OF THE POKROVSKY QUARRY

MONOGRAPHIC SERIES «EUROPEAN SCIENCE»

BOOK 32. PART I

Authors:

Kovalenko V., Gurin I., Zirnieiev S., Lysenko V., Siverskyi S.,
Stepanenko O., Kitayev O., Doskoch V.

The scientific achievements of the authors of the monograph were also reviewed and recommended for
publication at the international scientific symposium

**«Der Stand der Entwicklung von Wissenschaft und Technik im XXI Jahrhundert/
The level of development of science and technology in the XXI century '2024»**
(September 30, 2024)

Monograph published in the author's edition

The monograph is included in

International scientometric databases

500 copies
September, 2024

Published:
ScientificWorld -NetAktivatV
Lußstr 13,
Karlsruhe, Germany



e-mail: editor@promonograph.org
<https://desymp.promonograph.org>

ISBN 978-3-989240-58-2



9

783989

240582



<https://desymp.promonograph.org>

e-mail: editor@promonograph.org

