

Український державний університет науки і технологій
Навчально-науковий інститут
"Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту"

Кафедра Електрорухомий склад залізниць
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

А.М. Афанасов
(підпис) (ПІБ)

20__ р. _____ «__»

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього «магістр»

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(шифр) (назва)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код) (повна назва)

Спеціалізація Електричний транспорт

Тема Розробка методик розрахунку характеристик
ЕРС з асинхронним тяговим приводом.

Theme Development of methods for calculating the characteristics
of electric rolling stock with asynchronous traction drive.

Керівник дипломної роботи професор Гетьман Г. К.
(посада) (підпис) (П. І. Б.)

Нормоконтролер професор Гетьман Г. К.
(посада) (підпис) (П. І. Б.)

Студент групи ЕТ2021 Бака Б. О.
(група) (підпис) (П. І. Б.)

Student Baka Bohdan
(Family name)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Реферат

Розрахунково-пояснювальна записка до дипломної роботи «Розробка методик розрахунку характеристик ЕРС з асинхронним тяговим приводом» складає 115 сторінок, 23 таблиці, 29 рисунка та 9 джерел використаної літератури. Графічна частина складається з 10 листів.

Робота присвячена розробці та дослідженню методів розрахунку характеристик регульованих частотою асинхронних тягових двигунів.

В першому розділі проведений принцип регулювання асинхронного тягового двигуна.

В другому розділі розглянута еквівалентна схема заміщення та аналіз основних співвідношень для асинхронної регульованої частотою електромашини та її характеристики.

Третій розділ присвячено розрахунку параметрів схеми заміщення асинхронної електромашини за результатами експериментальних досліджень. Також розглянута методика врахування зміни ступеня насичення кола намагнічування.

В четвертому розділі викладена методика визначення робочих та електротягових характеристик асинхронного електродвигуна АД 914У, здійснено їх розрахунок з урахуванням зміни ступеня насичення магнітної системи.

В п'ятому розділі здійснений розрахунок робочих та електротягових характеристик асинхронного електродвигуна АД 914У без урахування ступеня насичення магнітної системи та здійснено їх порівняння з характеристиками розрахованими у четвертому розділі, оцінено величину похибки за рахунок нехтування зміни ступеня насичення магнітної системи.

Ключові слова: аналіз, характеристика, методика, розрахунок, асинхронний тяговий двигун, асинхронний тяговий привод

						Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	5
1 Принцип регулювання асинхронного тягового двигуна.....	6
2 Характеристики електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом.	16
3 Еквівалентна схема заміщення асинхронного тягового двигуна.....	22
3.1 Різновиди схем заміщення	22
3.2 Визначення параметрів схеми заміщення	27
3.3 Методика врахування зміни ступеня насичення кола намагнічування.....	36
4 Методика визначення робочих та електротягових характеристик	51
4.1 Визначення поняття робочих характеристик.....	51
4.2 Методика розрахунку робочих характеристик	52
4.3 Розрахунок електротягових характеристик.....	82
4.3.1 Порядок розрахунку характеристик першої зони регулювання	83
4.3.2 Порядок розрахунку характеристик другої зони регулювання.....	84
4.3.3 Порядок розрахунку характеристик третьої зони регулювання	85
5 Аналіз похибок розрахунків при нехтуванні зміною насичення магнітної системи	90
5.1 Розрахунок робочих характеристик без урахування ступеня насичення магнітної системи.....	89
5.2 Розрахунок електротягових характеристик без урахування ступеня насичення магнітної системи	107
Висновок	113
Список використаних джерел	114
Список демонстраційних матеріалів.....	115

					Розробка методик розрахунку характеристик ЕРС з асинхронним тяговим приводом.					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.	Бака Б. О.				Розрахунково- пояснювальна записка			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Гетьман Г. К.								4	115
Реценз.								ДНУЗТ, гр. ЕТ2021		
Н. Контр.	Гетьман Г. К.									
Затверд.	Афанасов А. М.									

Вступ

Сучасний електрорухомий склад залізничного транспорту облаштовується безколекторним тяговим приводом, здебільшого асинхронним. Це обумовлено тим, що конструктивно прості асинхронні тягові двигуни з короткозамкнутим ротором при частотному регулюванні задовольняють умовам і вимогам електричної тяги.

До числа основних переваг асинхронного тягового приводу можна віднести:

- високу надійність асинхронного короткозамкненого тягового двигуна;
- підвищену надійність електричного обладнання системи перетворення енергії, а також пристроїв управління режимами роботи тягових двигунів;
- покращення тягових властивостей електровозу, що виникає за рахунок жорсткої механічної характеристики асинхронного тягового двигуна в режимі буксування коліс;
- скорочення витрат міді при виготовленні тягових двигунів;
- значне зменшення ваги асинхронного тягового двигуна у порівнянні з масою тягового двигуна постійного струму при однакових параметрах;
- автоматизацію процесами управління режимами роботи асинхронного тягового двигуна.

З поширенням застосування асинхронного тягового привода виникла потреба у вдосконаленні методів визначення його тягових характеристик. Існуючі методи розрахунку робочих характеристик асинхронних машин загальнопромислового призначення не передбачають врахування зміни ступеня насичення магнітної системи машини, оскільки при фіксованих значеннях амплітуди та частоти напруги джерела живлення ці зміни незначні і нехтування ними не вносить суттєвої похибки у розрахунки. Режими навантаження тягових двигунів електрорухомого складу передбачають регулювання робочого магнітного потоку у відносно широких межах, тому нехтування впливом зміни ступеня насичення магнітної двигуна суттєво знижує точність розрахунку його характеристик.

У зв'язку з викладеним є актуальною й важливою науково-технічною задачею розробка методики визначення характеристик частотно-регульованих тягових асинхронних машин з урахуванням зміни ступеня насичення магнітної системи.

						Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 Принцип регулювання асинхронного тягового двигуна

На магістральному електрорухомому складі для живлення асинхронних тягових двигунів використовують спеціальні статичні перетворювачі, що дозволяють на ділянках постійного струму або однофазного змінного струму отримати трифазну напругу змінної частоти (від $0,5 \div 1,5$ Гц при рушанні з місця до частоти, що відповідає максимальній швидкості руху) і з регульованою амплітудою (від мінімальної при рушанні до відповідної номінальній напрузі обмотки статора або з урахуванням необхідного перевищення).

Перетворювач повинен забезпечувати реалізацію режимів тяги і електричне гальмування.

Схема силового перетворювача включає (див. рис. 1.1) три основні структурні частини [2]: вхідний перетворювач 1, проміжну ланку 2 і вихідний перетворювач 3.

У таких перетворювачах відбувається дворазове перетворення енергії: надходить з контактної мережі енергія спочатку перетворюється в електроенергію постійного струму, а потім - в електроенергію трифазного змінного струму.

Вхідний перетворювач необхідний для узгодження параметрів електроенергії контактної мережі і параметрів, необхідних для роботи тягових двигунів. Крім того вхідний перетворювач зазвичай забезпечує стабілізацію режимів роботи тягового приводу при коливаннях напруги в контактній мережі і захист ліній зв'язку і СЦБ, котрий заважає впливу електрорухомого складу.

Як на електровозі постійного, так і змінного струму на виході вхідного перетворювача отримують або стабілізовану, або регульовану за певним алгоритмом напругу постійного струму. У режимі рекуперативного гальмування вхідний перетворювач повинен забезпечити віддачу електроенергії в контактну мережу (постійного або змінного струму).

Вихідний перетворювач представляє собою інвертор струму або напруги. Він формує на затискачах статорної обмотки двигуна симетричну трифазну напругу (синусоїдальної або несинусоїдної форми).

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	
					6

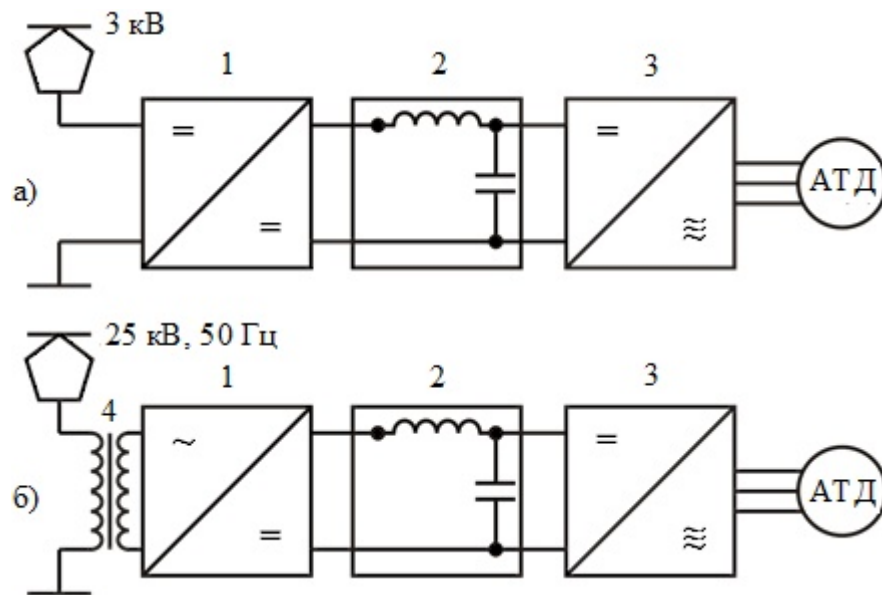


Рисунок 1.1 – Структурна схема статичного перетворювача частоти і числа фаз електровоза з асинхронним тяговим приводом (а - електровоз постійного струму; б - електровоз змінного струму) 1 - вхідний перетворювач; 2 - проміжна ланка; 3 - вихідний перетворювач, 4 - понижуючий трансформатор

Якщо в якості вихідного перетворювача застосований інвертор струму, то проміжна ланка являє собою L - фільтр. У разі використання інвертора напруги проміжна ланка являє собою C і LC фільтри.

У залежності від прийнятої схеми перетворення енергії регулювання амплітуди вихідної напруги може здійснюватися вхідним чи вихідним перетворювачем.

Основні параметри електровоза, такі як потужність, сила тяги і швидкість руху номінального режиму, діаметр бандажів ведучих коліс і конструктивна швидкість, встановлюються при обґрунтуванні технічних вимог на новостворюваний електровоз. При цьому розробники електровоза вільні у виборі передавального відношення тягового редуктора, амплітуди і частоти напруги і струму статора, числа пар полюсів обмотки статора та інше.

Параметри всіх структурних складових тягового приводу впливають на його техніко-економічні показники.

Частота обертання валу двигуна при заданій швидкості руху електровоза і

					Арк.
					7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

діаметра провідних коліс визначається передатним відношенням тягового редуктора. Значення останнього практично завжди вибирається максимально можливим за умовами забезпечення необхідних показників надійності його елементів. У цьому випадку діапазон регулювання частоти струму статора залежить від кількості пар полюсів його обмотки.

Багатополюсне виконання сприяє більш повному використанню активних матеріалів. Так перехід від восьмиполюсної конструкції тягового двигуна типу НБ-607 до шестиполюсної при одній і тій же частоті обертання ротора призводить до збільшення маси активних матеріалів до 10%, а перехід на чотирьохполюсну обмотку - до 23-26% [2]. Крім того, підвищення числа пар полюсів дозволяє знизити сумарні втрати в приводі і підвищити його к.к.д.

Разом з тим при зниженні числа пар полюсів знижуються втрати енергії в статичному перетворювачі. Так у випадку, коли в якості вхідної ланки застосований чотирьохквadrантний випрямляч, а двигун живиться від інвертора напруги, перехід з восьмиполюсної на чотирьохполюсну конструкцію двигуна типу НБ-607 через зниження частоти (у номінальному режимі з 75 Гц до 35 Гц) супроводжується зменшенням втрат потужності в перетворювачі на 37% [2].

Тому зрозуміло, що типи перетворювачів і такі параметри тягового приводу, як амплітуда і частота напруги і струму тягового двигуна, полюсність тягового двигуна та інші повинні визначатися так, щоб забезпечити необхідні техніко-економічні показники тягового приводу в цілому. Вибір типів окремих структурних ланок перетворювача і названих вище параметрів тягового приводу представляє собою окрему специфічну задачу, рішення якої може бути отримано методами пошуку оптимальних рішень.

Частота і амплітуда напруги на обмотках статора при веденні поїзда повинна змінюватися за певним алгоритмом у залежності від встановленого в якості мети режиму руху поїзда (наприклад, розгін до заданої швидкості при підтримці заданої сили тяги, стабілізація швидкості руху на заданому рівні, гальмування з метою зниження швидкості руху в місцях її обмеження і т.д.) та умов руху (профіль колії, рівень напруги в контактній мережі та інше)

						Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Характер зміни швидкості руху залежить, як впливає з рівняння руху поїзда (1.1), від співвідношення діючих на поїзд сил, тобто від знаку і величини результуючої рівнодіючої сили [2].

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\zeta}{(1 + \gamma)m} (F_k - W_k - B_k). \quad (1.1)$$

У кожному конкретному випадку результуюча сила (за абсолютною величиною і за спрямуванням) однозначно визначається дотичною силою (тяги або гальмування), що розвивається електровозом. Тому незалежно від алгоритму управління роботою тягового приводу основним керованим параметром буде електромагнітний момент двигуна (сила тяги електровоза).

Основні принципи побудови систем управління тяговим асинхронним приводом розглянемо на прикладі спрощеної схеми управління [2], наведеної на рис. 1.2.

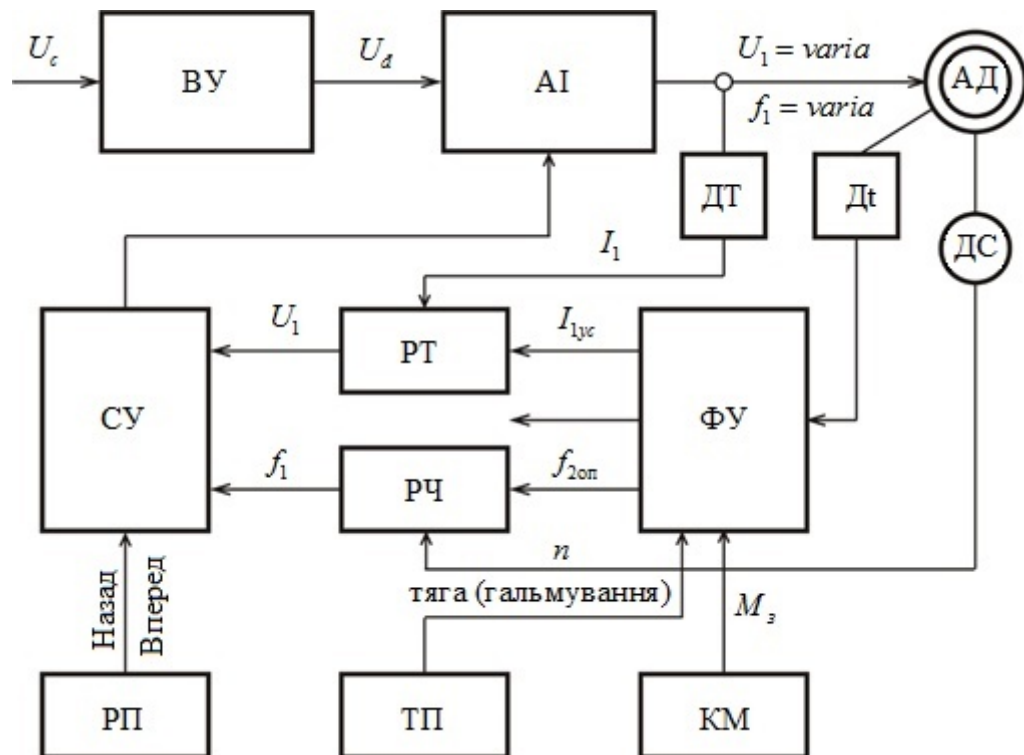


Рисунок 1.2 – Спрощена структурна схема системи управління асинхронним тяговим приводом

Порядок відкриття тиристорів автономного інвертора АІ визначається системою сигналів, що формуються системою управління СУ. Нею ж визначається порядок чергування фаз тягового двигуна (напрямок руху) у залежності від положення реверсивного перемикача РП. У тяговому двигуні встановлений датчик ДС частоти обертання ротора. З його допомогою здійснюється безперервне спостереження за швидкістю руху електровоза.

Формувач уставок ФУ визначає значення струму статора I_{1yc} і частоти $f_{2оп}$, при яких забезпечується реалізація заданої контролером машиніста КМ величини обертового моменту M_3 (або сили тяги) при виконанні умови [2]

$$\frac{I_1}{M} \rightarrow \min \quad \text{або} \quad \frac{I_1^2}{M} \rightarrow \min. \quad (1.2)$$

Для обліку залежності частот $f_{2оп}$ від температури обмоток ротора в формувач уставок ФУ необхідно ввести сигнал від датчика температури обмоток Дт [2].

Слід підкреслити, що оснащення системи керування асинхронним тяговим приводом пристроями, що забезпечують реалізацію абсолютного ковзання, заданого однозначною функцією $f_{2оп}(v, I_1)$, зводить керування приводом до регулювання одного впливу – амплітуди напруги на обмотках двигуна, оскільки згідно з виразом (1.3) з однозначності функції $f_2(v, I_1)$ впливає однозначність функції $f_1(v, I_1)$. [2]

$$f_1 = \frac{pn}{60} + f_2 \quad \text{або} \quad f_1 = kv + f_2, \quad (1.3)$$

Як і для електровозів з колекторними тяговими двигунами постійного або

						Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пульсуючого струму, для асинхронного привода регулювання напруги на обмотках статора може бути дискретним або плавним при ручному й автоматизованому керуванні або при автоматичному керуванні із забезпеченням зміни режиму навантаження за заданою програмою.

Так, зокрема, при $U_1 = \text{const}$ й $f_2 = \text{const}$ реалізується тягова характеристика $F_k(v)$, близька до серієсної [2]. Це впливає [2] з виразу (1.4), оскільки величина відношення r_1/f_1 при $f_1 > f_{1H}$ мала.

$$M_{\text{эм}} = \frac{pm_1 r_2' E_1^2}{2\pi f_1^2 f_2 \left[\left(\frac{r_2'}{f_2} \right)^2 + \left(\frac{x_{2H}'}{f_{1H}} \right)^2 \right]}. \quad (1.4)$$

Формування такої залежності $F_k(v)$ пояснює рис. 1.3, на якому показані тягові характеристики, що відповідають деякому значенню напруги U_1 , для ряду значень частоти струму статора $f_{1(1)} < f_{1(2)} < f_{1(3)} < f_{1(4)}$. Взаємне розташування графіків $F_k(v)$ визначається тим, що при $U_1 = \text{const}$ максимальне значення обертового моменту приблизно обернено пропорційно частоті струму статора f_1 .

Згідно з виразом (1.5)

$$f_1 = \frac{pn}{60} + f_2 \quad \text{або} \quad f_1 = kv + f_2, \quad (1.5)$$

швидкість руху, що відповідає заданому абсолютному значенню f_2 й частоті струму статора $f_{1(i)}$, дорівнює:

$$v_i = \frac{f_{1(i)} - f_2}{k}. \quad (1.6)$$

Тому, якщо кожному значенню швидкості v_i поставити у відповідність силу

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тяги $F_{кi}$, як показано на графіках рис. 1.3 [2], і з'єднати отримані точки суцільною лінією, то одержимо тягову характеристику, що відповідає заданому U_1 й прийнятому закону регулювання ковзання $f_2(v)$. Очевидно, що при $f_2 = \text{const}$ тягова характеристика близька до гіперболи.

Синхронна й реальна швидкість руху не залежать при заданих f_2 і f_1 від напруги U_1 , а сила тяги пропорційна (за інших рівних умов) її квадрату. Зі зростанням U_1 значення F_k для фіксованої швидкості руху буде збільшуватися. Тому з підвищенням напруги тягові характеристики зміщуються в область вищих значень сили тяги.

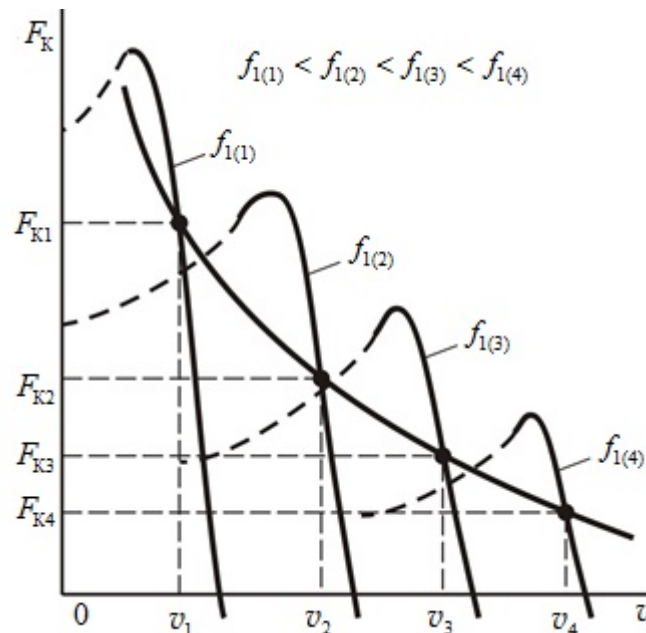


Рисунок 1.3 – Визначення тягової характеристики електровозів з асинхронним тяговим приводом

Зі сказаного випливає, що в разі ступеневого регулювання вхідної напруги тягові характеристики мають вигляд графіків, зображених на рис. 1.4.[2] Викладене дає підставу сказати, що якщо системою керування забезпечується регулювання частоти f_1 з умови підтримки заданого абсолютного ковзання f_2 ,

то асинхронний привод набуває властивості, подібної властивості саморегулювання машини постійного струму з послідовним збудженням. Насправді, якщо при показаній на рис. 1.4 залежності опору руху $W_{к1}(v)$ рух поїзда відбувається при усталеній швидкості v_{y1} , то збільшення W_k до значення, що відповідає залежності $W_{к2}(v)$ (точка а на рис. 1.4), зумовить тенденцію зниження швидкості руху до значення v_{y2} , яке буде супроводжуватися відповідним зниженням частоти f_1 , зростанням магнітного потоку, оскільки $E_1 \approx U_1 = \text{const}$, і збільшенням сили тяги.

Таким чином, тягова характеристика електровоза із частотно-регульованим асинхронним тяговим приводом може бути зображена набором кривих $F_k(v)$ для низки значень U_1 із діапазону $U_{1\min} \leq U_1 \leq U_{1н}$, як показано на рис. 1.4. Однак тягові характеристики у вигляді графіків рис. 1.4 відповідають тільки випадку ступеневого регулювання напруги на обмотці статора. При плавному регулюванні вхідної напруги може бути реалізована будь-яка комбінація координат тягової характеристики в межах допустимих значень.

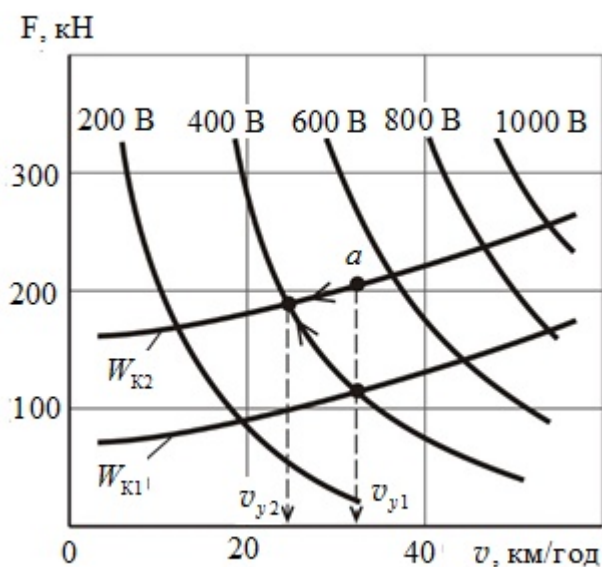


Рисунок 1.4 – Тягові характеристики однієї секції електровоза серії ВЛ80^А (тяговий двигун типу НБ-601)

Граничні значення сили тяги в зоні допустимих швидкостей ($0 \leq v \leq v_{\Pi}$) обмежені або за умовами зчеплення, або максимально допустимим струмовим навантаженням перетворювача, як показано на рис. 1.5.[2]

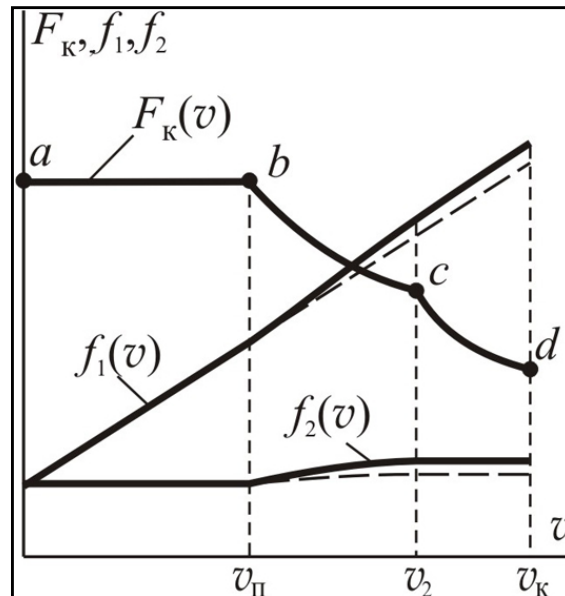


Рисунок 1.5 – Зміна параметрів режиму асинхронного двигуна під час реалізації граничної тягової характеристики

У зоні $v_{\Pi} < v \leq v_k$ сила тяги обмежена потужністю перетворювача (зона $v_{\Pi} < v \leq v_2$) або граничною серієсною характеристикою (зона $v_2 < v \leq v_k$).

На сучасному електрорухомому складі використовують тільки плавне регулювання тягової потужності й зазвичай забезпечується два основні режими керування – підтримка заданої величини сили тяги й стабілізація заданої швидкості руху. З метою реалізації цих режимів у системі керування передбачаються канали регулювання струму й стабілізації швидкості руху.

Якщо контролером КМ задана величина обертового моменту M_3 (сили тяги) і задавачем швидкості задана швидкість стабілізації $v_{ст}$, то у випадку $v < v_{ст}$ формувач уставок визначає струм $I_1 = I_{1yc}$, що відповідає величині моменту M_3 . Регулятор струму РС за результатами порівняння I_{1yc} й сигналу датчика

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

струму ДС по каналу регулювання U_1 забезпечує (за рахунок внутрішньої системи регулювання вихідної напруги АІ або вихідної напруги U_d вхідного перетворювача ВУ) підтримку струму $I_1 = I_{1yc}$. Зі збільшенням швидкості канал регулювання f_1 забезпечує відповідне підвищення частоти струму статора.

У режимі $I_1 = I_{1yc}$ канал стабілізації швидкості відключений. Він включається після досягнення заданої швидкості v_{ct} .

Канал регулювання швидкості виробляє сигнал, що залежить від різниці v_{ct} і швидкості руху поїзда v . Цей сигнал через канал регулювання U_1 за рахунок збільшення або зменшення вихідної напруги АІ забезпечує стабілізацію швидкості $v = v_{ct}$ за рахунок реалізації рівності сили тяги й сили опору руху.

У схемах керування асинхронним приводом передбачається гальмовий перемикач ГП, що забезпечує переведення двигуна в режим електричного гальмування.

						Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 Характеристики електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом

Для оцінки показників роботи електричної машини використовують їх характеристики. Для асинхронних електричних машин загального призначення використовують так звані робочі характеристики, залежності споживаної потужності P_1 , первинного струму I_1 , коефіцієнта потужності $\cos\varphi$, моменту на валу M_2 , ковзання s , коефіцієнта корисної дії η від корисної потужності P_2 при роботі з номінальною напругою і частотою [1]. Саме з допомогою робочих характеристик можна знайти усі основні величини, що визначають режим роботи двигуна при різних навантаженнях.

На практиці розрахунок робочих характеристик виконують за допомогою кругових діаграм або на основі еквівалентних схем заміщення.

Для розрахунків використовують або Т-образну, або Г-образну еквівалентні схеми заміщення. Т-подібна еквівалентна схема заміщення приведена на рисунку 2.1.

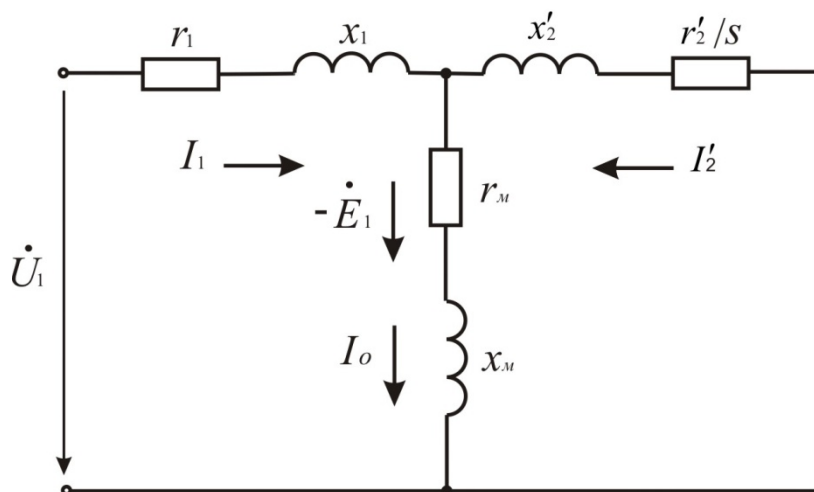


Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема заміщення асинхронної машини

де U_1 – фазна напруга обмотки статора;

x_2' , r_2' – приведені до статорної обмотки індуктивний і активний опори

обмотки ротора;

r_1 і x_1 – активний та індуктивний опори розсіювання обмотки статора;

s – відносне ковзання ротора;

x_M – індуктивний опір взаємоіндукції наведених вторинного та первинного ланцюгів;

r_M – активний опір ланцюга намагнічування, що відбиває наявність втрат в сталі;

I_2' – приведений до ланцюга статора струм ротора;

I_0 – струм холостого ходу;

I_1 – струм статора.

На основі приведеної схеми заміщення запишемо деякі розрахункові вирази.
Приведений струм ротора [2]

$$I_2' \cong \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \quad (2.1)$$

Якщо ввести позначення:

f_1 – частота струму статора;

f_2 – частота струму ротора;

f_{1H} – частота струму статора в номінальному режимі;

x_{1H} , x_{2H}' – індуктивні опори розсіювання відповідно обмоток статора і ротора при $f_1 = f_{1H}$ та $f_2 = f_{1H}$ і врахувати, що

$$x_1 = \frac{f_1}{f_{1H}} x_{1H}; \quad x_2' = \frac{f_1}{f_{1H}} x_{2H}'; \quad s = \frac{f_2}{f_1}, \quad (2.2)$$

						Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

то вираз для I'_2 можна записати у вигляді [2]

$$I'_2 \cong \frac{U_1}{f_1 \sqrt{\left(\frac{r_1}{f_1} + \frac{r'_2}{f_2}\right)^2 + \left(\frac{x_{1H} + x'_{2H}}{f_{1H}}\right)^2}}. \quad (2.3)$$

Розвиваюча в роторі електромагнітна потужність [2]

$$P_{\text{эм}} = m_1 I_2'^2 \frac{r'_2}{s} \quad \text{або} \quad P_{\text{эм}} = m_1 I_2'^2 r'_2 \frac{f_1}{f_2}, \quad (2.4)$$

де m_1 – число фаз обмотки статора.

Частота обертання магнітного потоку, як відомо[3]

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \quad (2.5)$$

де p – число пар полюсів.

Оскільки розвиваючий в роторі електромагнітний момент, що обертає [2]

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{2\pi n_1}, \quad (2.6)$$

то на підставі (2.3) - (2.5) отримаємо

$$M_{\text{эм}} \cong \frac{p m_1 r'_2 U_1^2}{2\pi f_1^2 f_2 \left[\left(\frac{r_1}{f_1} + \frac{r'_2}{f_2}\right)^2 + \left(\frac{x_{1H} + x'_{2H}}{f_{1H}}\right)^2 \right]}. \quad (2.7)$$

З наведеного виразу випливає, що електромагнітний момент асинхронного двигуна конкретного конструктивного виконання визначається значеннями U_1 , f_1 та f_2 .

Електромагнітну потужність можна представити також у вигляді [2]

$$P_{\text{эм}} = m_1 E'_2 I'_2 \cos \psi_2, \quad (2.8)$$

де E'_2 – діюче значення приведенного до первинного кола е.р.с. ротора;

ψ_2 – кут між векторами \vec{E}'_2 і \vec{I}'_2 .

Е.р.с. обмотки статора E_1 і е.р.с. обмотки ротора E'_2 [2]

$$E_1 = E'_2 = \pi \sqrt{2} k_{\text{об}} w_1 f_1 \Phi, \quad (2.9)$$

де $k_{\text{об}}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки статора;

w_1 – число витків у фазі обмотки статора;

Φ – магнітний потік на один полюс.

На підставі (2.8) і (2.9) отримаємо

$$M_{\text{эм}} = \frac{m_1}{\sqrt{2}} p k_{\text{об}} w_1 \Phi I'_2 \cos \psi_2. \quad (2.10)$$

Струм холостого ходу знайдемо як [4]

$$I_o = \frac{E_1}{z_{\text{мн}}}. \quad (2.11)$$

Із формули (2.9) знаходимо значення магнітного потоку як

						Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Phi = \frac{E_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot k_{об} \cdot w_1 \cdot f_1}. \quad (2.12)$$

Приведені вирази показують неможливість одноваріантного розрахунку робочих характеристик при використанні у якості аргументу P_2 .

Сказане можна підтвердити на прикладі формули (2.12). З цієї причини на практиці розрахунок виконують не для ряду потрібних значень P_2 , а для ряду орієнтовано прийнятих значень відносного ковзання s , а значення P_2 – яке вийде. Тоді суть розрахунку полягає в тому, що задавшись певною величиною ковзання s або частотою ротора f_2 знаходять корисну потужність P_2 , на валу асинхронної машини, а також інші величини що відповідають цьому s . При розрахунку слід задаватися значеннями ковзання приблизно у межах $s = (0,2 - 1,3)s_n$ [4], де номінальне ковзання s_n можна попередньо визначити по формулі [4]

$$s_n = \frac{I_2' \cdot r_2'}{E_1}. \quad (2.13)$$

Для спеціаліста з досвідом розрахунку характеристик машин даного класу розрахунки виконують для п'яти шести значень ковзання, вибираючи їх приблизно через рівні інтервали.

Даний підхід незручний тим, що виконується не для заданих значень аргументу. Крім того при такому підході залишається відкритим питання врахування зміни насичення магнітного кола машини при зміні параметрів режиму навантаження.

У зв'язку з викладеним далі буде запропонована процедура прямого розрахунку робочих характеристик при використанні так званої незмінної потужності P_2 , яка одночасно відкриває можливість врахування зміни степені насичення магнітного кола машини.

						Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Слід відмітити, що нині серед спеціалістів немає одностайної думки відносно суті характеристик тягових асинхронних двигунів керуючих частотою. Однак, кінцевою метою розрахунку характеристик електрорухомого складу є розрахунок його основних показників (сили тяги, коефіцієнта корисної дії та інше) в режимі тяги і гальмування, то, напевно, доцільно для таких двигунів під електротяговими характеристиками розуміти залежність від швидкості руху (або частоти струму ротора):

- обертового моменту;
- коефіцієнта корисної дії;
- коефіцієнта потужності;
- струму статора та його активної складової.

З очевидністю можна стверджувати, що такі характеристики повинні бути розраховані для всіх зон регулювання, які використовуються. Наприклад, для зони пуску при заданому законі регулювання повинен бути заданий закон регулювання частоти струму ротора f_2 та обертового моменту M . Визначити необхідно:

- фазну напругу обмотки статора U_1 ;
- частоту струму статора f_1 ;
- коефіцієнт корисної дії η ;
- коефіцієнт потужності $\cos\varphi$;
- струм обмотки статора I_1 ;
- активну складову струму статора I_{1a} .

Для пускових зон повинні бути відомі закони регулювання потужності і напруги від швидкості руху [$P_2(v)$ та $U(v)$] або від частоти [$P_2(f_1)$, $U(f_1)$]. Абсолютне ковзання підлягає визначенню.

Особливістю розрахунку частотно-регульованої машин є необхідність врахування степені насичення магнітного кола, оскільки для таких машин використовується регулювання магнітного потоку[4].

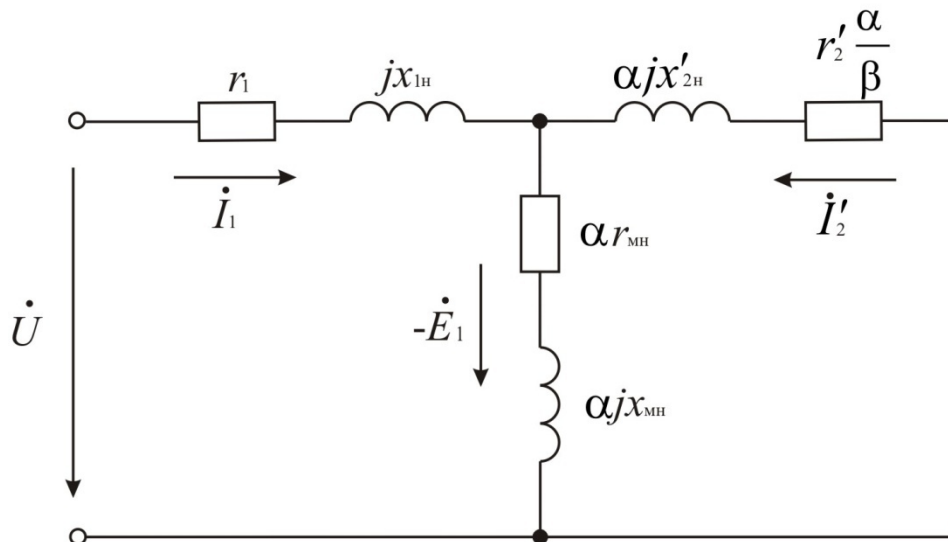
Виходячи із сказаного нижче розглянуто можливість використання для розрахунку робочих та електротягових характеристик єдиної процедури.

						Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 Еквівалентна схема заміщення асинхронного тягового двигуна

3.1 Різновиди схем заміщення.

Заради розробки єдиної розрахункової методики для всіх режимів роботи двигуна будемо використовувати схему заміщення частотно-регульованої асинхронної машини [2], яка показана на рисунку 3.1.1.



α – відносна частота струму статора;

β – відносна частота струму ротора.

Рисунок 3.1.1 – Схема заміщення керована частотою асинхронної машини

У ряді випадків схему заміщення керованою частотою асинхронної машини доцільно представити у вигляді схем, що зображені на рисунку 3.1.2 а) та 3.1.2 б).

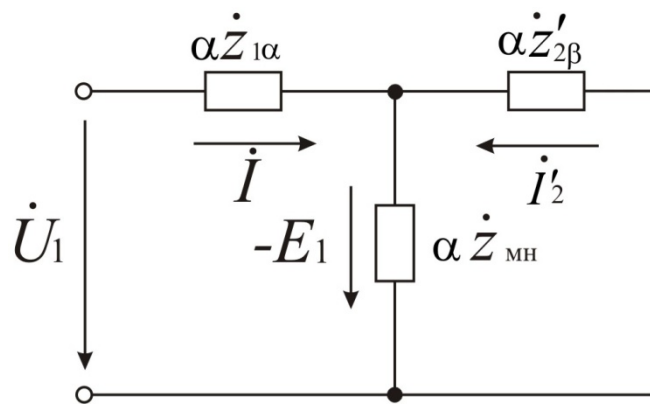
Для аналізу і розрахунку характеристик керованою частотою асинхронних машин будемо використовувати основні співвідношення, що наведені далі.

Відносна частота струму статора [5]

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1n}}, \quad (3.1.1)$$

де f_1 і f_{1n} – поточне і номінальне значення частоти струму статора.

а)



б)

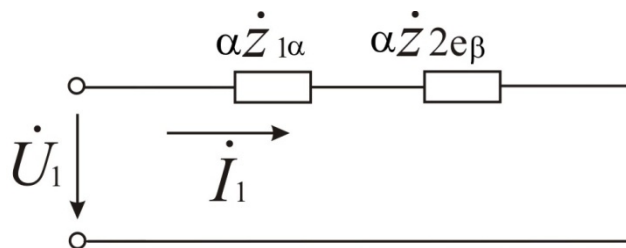


Рисунок 3.1.2 – Інші схеми заміщення керовані частотою асинхронної машини

Відносна частота струму ротора [5]

$$\beta = \frac{f_2}{f_{1H}}, \quad (3.1.2)$$

Від частоти f_1 залежить також індуктивний опір намагнічуючого кола x_m , тому далі приймемо позначення [2]

$$r_m = \alpha \cdot r_{mH} \quad (3.1.3)$$

$$x_m = \alpha \cdot x_{mH} \quad (3.1.4)$$

де r_{mH} та x_{mH} – значення активного r_m та реактивного x_m опору вітки намагнічування при певній частоті $f_1 = f_{1H}$.

Модулі комплексного опору фази обмотки статора, обмотки ротора (приведене до первинного кола) та намагнічуючого кола [2]

$$z_{1\alpha} = \sqrt{\left(\frac{r_1}{\alpha}\right)^2 + x_{1н}^2} \quad (3.1.5)$$

$$z'_{2\beta} = \sqrt{\left(\frac{r'_2}{\beta}\right)^2 + (x'_{2н})^2} \quad (3.1.6)$$

$$z_{мн} = \sqrt{r_{мн}^2 + x_{мн}^2} \quad (3.1.7)$$

Відмітимо, що індекси α та β в прийнятих вище позначеннях вказують на залежність величини даного опору від значення параметрів α та β .

Еквівалентний опір розгалуженої частини схеми заміщення рівний (див. рисунок 3.1.2б)) [2]

$$z_{2e\beta} = \frac{z_{2\beta} \cdot z_{мн}}{z_{м\beta}} \quad (3.1.8)$$

або

$$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2 \quad (3.1.9)$$

де

$$R_{2e\beta} = \operatorname{Re} z_{2e\beta} = \frac{(z_{2\beta})^2 \cdot r_{мн} + z_{мн}^2 \cdot \frac{r'_2}{\beta}}{z_{2м\beta}^2} \quad (3.1.10)$$

$$x_{2e\beta} = \operatorname{Im} z_{2e\beta} = \frac{(z'_{2\beta})^2 x_{мн} + z_{мн}^2 \cdot x'_{2н}}{z_{2м\beta}^2} \quad (3.1.11)$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Квадрат модуля комплексного опору $z_{2\beta}$ рівний [2]

$$z_{2\beta}^2 = \left(\frac{r_2'}{\beta} + r_{\text{мн}} \right)^2 + (x_2' + x_{\text{мн}})^2 \quad (3.1.12)$$

Вхідний опір фази $z_{\text{вх}}$ при номінальній частоті струму статора [2]

$$\dot{z}_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} + jx_{\text{вх}} \quad (3.1.13)$$

де

$$R_{\text{вх}} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta} \quad (3.1.14)$$

$$x_{\text{вх}} = x_{1\text{н}} + x_{2e\beta} \quad (3.1.15)$$

Залежність $E_1(P_{\text{ем}})$ представимо у вигляді [2]

$$E_1 = z_{2\beta}' \sqrt{\frac{P_{\text{ем}} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot 10^3}{m_1 \cdot r_2'}}, \quad (3.1.16)$$

Звідки магнітний потік знайдемо як:

$$\Phi = \frac{E_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot k_{\text{од}} \cdot w_1 \cdot \alpha \cdot f_{1\text{н}}}, \quad (3.1.17)$$

Знайдемо значення фазної напруги U_1 [2]

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 \cdot \dot{C}_E \quad \text{або} \quad U_1 = C_E \cdot E_1 \quad (3.1.18)$$

						Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для практичних розрахунків у вищенаведеному виразі доцільно виділити дійсну і уявну складову, тобто представити коефіцієнт \dot{C}_E у вигляді [2]

$$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2} \quad (3.1.19)$$

де

$$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{ex} + x_{2e\beta} \cdot x_{ex}}{z_{2e\beta}^2} \quad (3.1.20)$$

$$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{ex} - x_{2e\beta} \cdot R_{ex}}{z_{2e\beta}^2} \quad (3.1.21)$$

Отже, при розгляді основних співвідношень асинхронної регульованої частотою електричної машини необхідно враховувати залежність параметрів кола намагнічування r_{mn} та x_{mn} від параметрів навантажувальних режимів. Це пояснюється тим, що на відміну від працюючих при $f_1 = \text{const}$ і $U_1 = \text{const}$ асинхронних машин, магнітний потік і степінь насичення магнітного кола яких при робочих навантаженнях змінюється незначно, у регульованих частотою тягових асинхронних машин при реалізації різних режимів навантаження при $f_1 = f_{1n}$ магнітний потік може регулюватися у широких межах, що супроводжується зміною насичення магнітної системи двигуна.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

3.2 Визначення параметрів схеми заміщення та їх аналіз

Для визначення параметрів схеми заміщення асинхронних частотно-регульованих тягових двигунів необхідно визначити параметри приведеної на рисунку 2.1 еквівалентної схеми заміщення асинхронної машини.

Приведемо розрахунки для тягового двигуна АД-914У електровозу ДС3. З протоколів кваліфікаційних випробувань приймемо для розрахунку наступні вихідні дані:

Параметри номінального режиму:

- напруга обмотки статора (лінійна), В U_11800
- частота струму статора, Гц $f_{1н}$55,9
- потужність на валу, кВт P_21200
- струм, А I_1450
- частота обертання ротора, об/хв. n1140

Опір обмоток двигуна

Активний, при температурі 20° С:

- фази статора, Ом r_10,0226
- ротора, приведений до статора, Ом r'_20,0181

Активний, при температурі 150° С

- фази статор Ом r_10,0344
- ротора, приведений до статора, Ом r'_20,0275

Індуктивний опір при $f_1 = 50$ Гц

- фази статора, Ом x_10,213
- обмотки ротора, приведений до статора, Ом x'_20,161

Дані із дослідів холостого ходу:

- залежність струму холостого ходу від лінійної напруги $I_0(U_{л})$
.....рисунок 3.2.1
- залежність втрат у сталі статора від напруги холостого ходу $P_{ст}(U_{л})$
..... рисунок 3.2.2

- залежність механічних втрат від частоти струму статора

$p_m(f_1)$ рисунок 3.2.3

Конструктивні параметри

- число полюсів $2p$6
- число пазів статора z_1 72
- число фаз обмотки статора m_13
- число пазів на полюс і фазу q 4
- число витків в обмотці фаз w_148
- крок по пазам.....10
- число паралельних гілок.....1
- число ефективних провідників у пазу.....4

Аналізуючи приведені вихідні дані бачимо, що в ньому відсутні відомості про значення параметрів схеми заміщення r_m та x_m . Для їх визначення використаємо взяті з [2] та приведені на графіках (рисунки 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3) дані дослідів холостого ходу та короткого замикання.

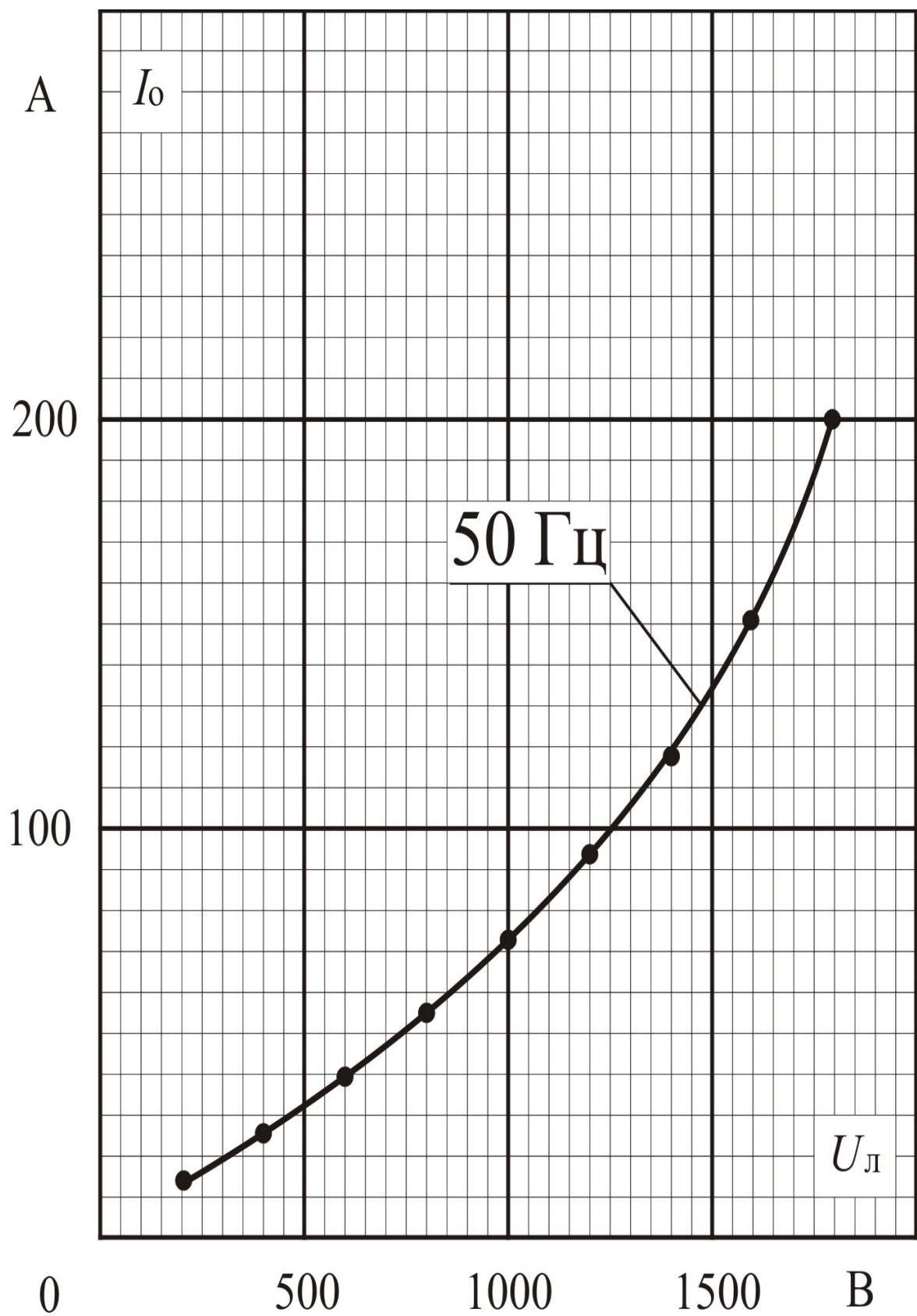


Рисунок 3.2.1 – Залежність струму холостого ходу тягового двигуна АД-914У від лінійної напруги

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	29

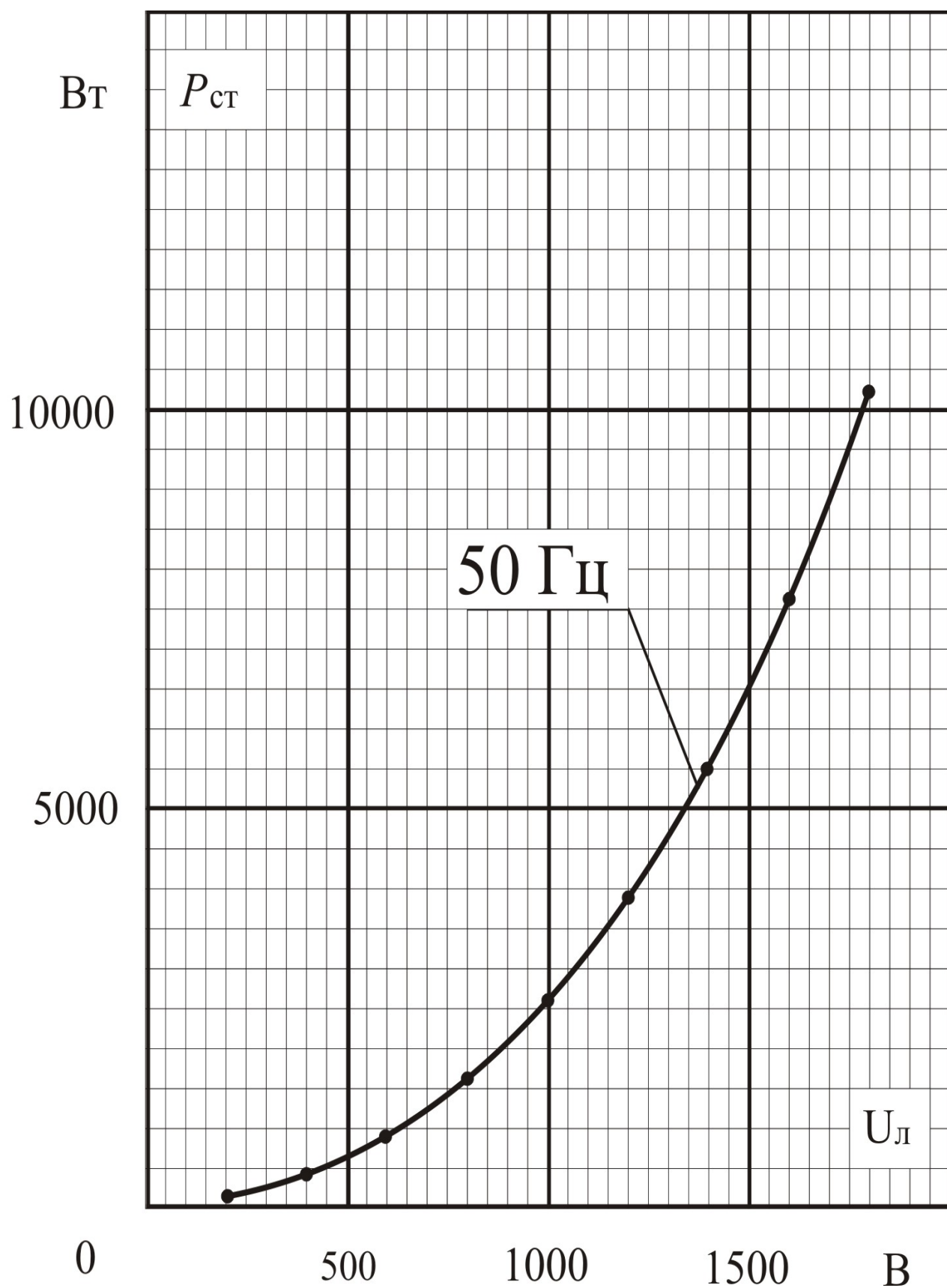


Рисунок 3.2.2 – Втрати у сталі тягового двигуна АД – 914У

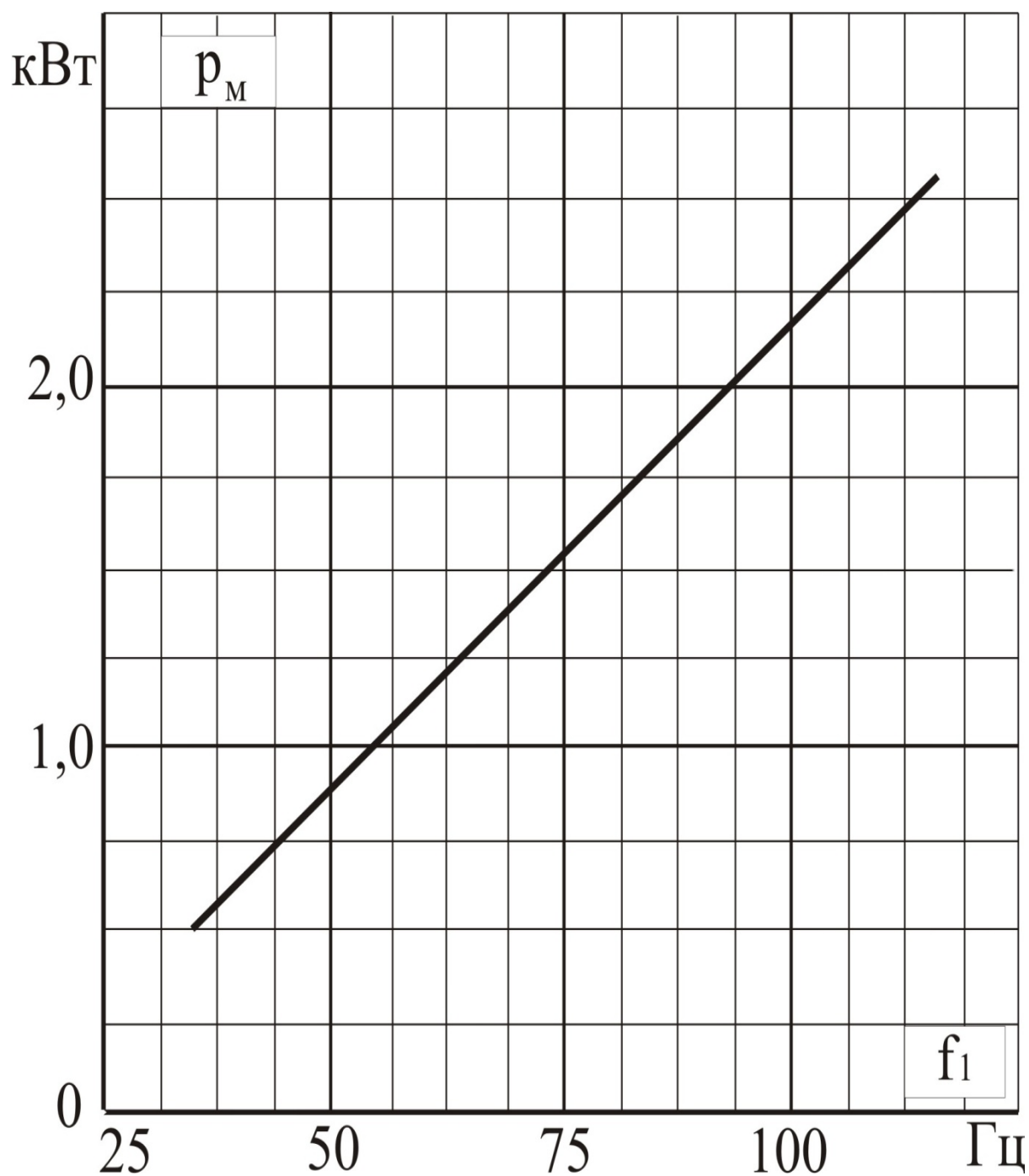


Рисунок 3.2.3 – Механічні втрати в тяговому двигуні АД-914У

Як відомо [1], втрати потужності у сталі

$$p_{cm} = m_1 I_0 r_m \quad (3.2.1)$$

де p_{cm} - втрати в сталі;

m_1 - число фаз в обмотці статора;

I_0 - фазний струм холостого ходу.

З виразу (3.1) знаходимо

$$r_m = \frac{p_{cm}}{m_1 I_0^2}, \quad (3.2.2)$$

Модуль вхідного опору схеми заміщення у досліді холостого ходу ($s = 0$) [3]

$$z_0 = \frac{U_\phi}{I_0} = \frac{U_\phi}{\sqrt{3} I_0}. \quad (3.2.3)$$

З іншого боку на основі схеми заміщення [2]

$$z_0 = \sqrt{(r_1 + r_m)^2 + (x_1 + x_m)^2} = \sqrt{r_0^2 + x_0^2}, \quad (3.2.4)$$

Так як $x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}$ то x_m можемо визначити як

$$x_m = x_0 - x_1. \quad (3.2.5)$$

Приведемо приклад розрахунку значень r_m та x_m для $U_\phi = 600\text{В}$ і $I_0 = 40\text{А}$ (рядок 3 таблиці 3.2.1).

Модуль вхідного опору фази [2]

						Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$z_o = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}I_0}, \quad (3.2.6)$$

$$z_0 = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 40} = 8,660 \text{ Ом.}$$

Таблиця 3.2.1 – Визначення параметрів еквівалентної схеми заміщення за даними дослідів

Експериментальні дані			Результати розрахунку									
$U_{\text{л}}$	I_0	$p_{\text{ст}}$	z_o	$r_{\text{м}}$	x_o	$x_{\text{м}}$	$r_{\text{мн}}$	$x_{\text{мн}}$	$z_{\text{м}}$	E_1	Φ	r_c
В	А	кВт	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	В	Вб	Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
200	13	0,1	8,882	0,1972	8,880	8,667	0,221	9,689	8,669	112,67	0,0114	380,84
400	26	0,4	8,881	0,1969	8,879	8,657	0,220	9,687	8,659	225,33	0,0228	380,8
600	40	0,9	8,660	0,1875	8,658	8,445	0,210	9,441	8,447	337,79	0,0343	380,34
800	57	1,7	8,103	0,1744	8,101	7,888	0,195	8,819	7,890	449,60	0,0456	356,72
1000	73	2,65	7,909	0,1658	7,907	7,694	0,185	8,602	7,695	561,64	0,0569	357,1
1200	90	3,8	7,698	0,1564	7,696	7,483	0,175	8,366	7,485	673,46	0,0683	358,07
1400	115	5,5	7,029	0,1386	7,027	6,814	0,155	7,618	6,815	783,58	0,0794	334,91
1600	150	7,8	6,158	0,1156	6,157	5,944	0,129	6,645	5,945	891,58	0,0904	305,74
1800	200	10,2	5,196	0,0850	5,195	4,982	0,095	5,570	4,983	996,41	0,1010	292,01

Активна складова опору гілки намагнічування[2]

$$r_m = \frac{p_{cm}}{3 \cdot I_0^2}, \quad (3.2.7)$$

$$r_m = \frac{900}{3 \cdot 40^2} = 0,1875 \text{ Ом.}$$

Активна складова вхідного опору [2]

$$r_0 = r_m + r_1, \quad (3.2.8)$$

$$r_0 = 0,1875 + 0,0226 = 0,2101 \text{ Ом.}$$

Реактивна складова вхідного опору [2]

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}, \quad (3.2.9)$$

$$x_0 = \sqrt{8,660^2 - 0,2101^2} = 8,658 \text{ Ом.}$$

Реактивна складова вітки намагнічування

$$x_m = x_0 - x_1, \quad (3.2.10)$$

$$x_m = 8,658 - 0,213 = 8,445 \text{ Ом.}$$

Результати розрахунків занесені до таблиці 3.2.1.

Дані дослідів холостого ходу, а відповідно і отримані значення r_m і x_m відповідають частоті $f_1 = 50$ Гц. Цій же частоті відповідають приведені у вихідних даних значення індуктивних опорів x_1 та x_2' .

						Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для цієї частоти струму статора , але за вихідними даними частота номінального режиму складає $f_{1H}=55,9$ Гц, значення опорів x_1 та x'_2 визначимо як

$$x_{1H} = \frac{x_1}{50} \cdot f_{1H}, \quad (3.2.11)$$

$$x_{1H} = \frac{0,213}{50} \cdot 55,9 = 0,238 \text{ Ом.}$$

$$x'_2 = \frac{x'_2}{50} \cdot f_{1H}, \quad (3.2.12)$$

$$x'_2 = \frac{0,161}{50} \cdot 55,9 = 0,180 \text{ Ом.}$$

При визначенні характеристик опори r_m та x_m приймають [2] пропорційними частоті струму первинного кола . Тому для номінального режиму ($f_{1H} = 55,9$ Гц) знайдемо

$$r_{mH} = \frac{r_m}{50} \cdot f_{1H}, \quad (3.2.13)$$

$$r_{mH} = \frac{0,1875}{50} \cdot 55,9 = 0,210 \text{ Ом.}$$

$$x_{mH} = \frac{x_m}{50} \cdot f_{1H}, \quad (3.2.14)$$

$$x_{mH} = \frac{8,445}{50} \cdot 55,9 = 9,441 \text{ Ом.}$$

						Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Методика врахування зміни ступеня насичення кола намагнічування

Як відомо [2] індуктивність обмоток асинхронної машини залежить від ступеня її насичення. Щоб оцінити міру впливу цього фактору на стабільність параметрів вітки намагнічування схеми заміщення, виконаємо розрахунки значень r_m та x_m для всього діапазону напруги, яка зафіксована в досліді холостого ходу (див. стовбець 1 таблиці 3.2.1). Приведемо також розрахунок значень магнітного потоку Φ .

Значення r_m та x_m визначимо за допомогою приведених вище формул з пункта 3.2 (3.2.7) та (3.2.10). Вони приведені в колонках 5 та 7 таблиці 3.2.1.

Щоб отримати залежності r_m та x_m від магнітного потоку, необхідно кожній напрузі, зафіксованій в досліді холостого ходу, поставити у відповідність магнітний потік на полюс Φ . Для цього використаємо відомий вираз для ефективного значення е.р.с. обмотки статора [6]

$$E_1 = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot k_{об} \cdot w_1 \cdot f_1 \cdot \Phi, \quad (3.3.1)$$

де $k_{об}$ - обмоточний коефіцієнт обмотки статора;

w_1 - число витків обмотки статора.

Як результат аналізу векторної діаграми асинхронної машини у режимі ідеального холостого ходу ($f_2=0$), бачимо що значення е.р.с. E_1 можна розрахувати по відомому значенню напруги U_n [7]. Тобто, модуль е.р.с. обмотки статора

$$E_1 \cong U_0 - I_0 z_1, \quad (3.3.2)$$

$$E_1 = I_0 z_m, \quad (3.3.3)$$

де

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}, \quad z_i = \sqrt{r_i^2 + x_i^2}.$$

Для нашого прикладу

$$z_1 = \sqrt{0,0226^2 + 0,213^2} = 0,214 \text{ Ом.}$$

$$z_m = \sqrt{8,445^2 + 0,1875^2} = 8,447 \text{ Ом.}$$

Неважко бачити, що для $f_1 = 50$ Гц при визначенні z_1 та z_m можна знехтувати величинами r_1 та r_m та прийняти $z_m = x_m$, $z_1 = x_1$ і визначити E_1 як [2]

$$E_1 = I_0 \cdot x_m, \quad (3.3.4)$$

$$E_1 = 40 \cdot 8,445 = 337,79 \text{ В.}$$

або

$$E_1 \cong \frac{U_n}{\sqrt{3}} - I_0 \cdot x_1, \quad (3.3.5)$$

$$E_1 \cong \frac{600}{\sqrt{3}} - 40 \cdot 0,213 = 337,89 \text{ В.}$$

Величину похибки при такому спрощенні відображає графік рисунок 3.3.1.

						Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

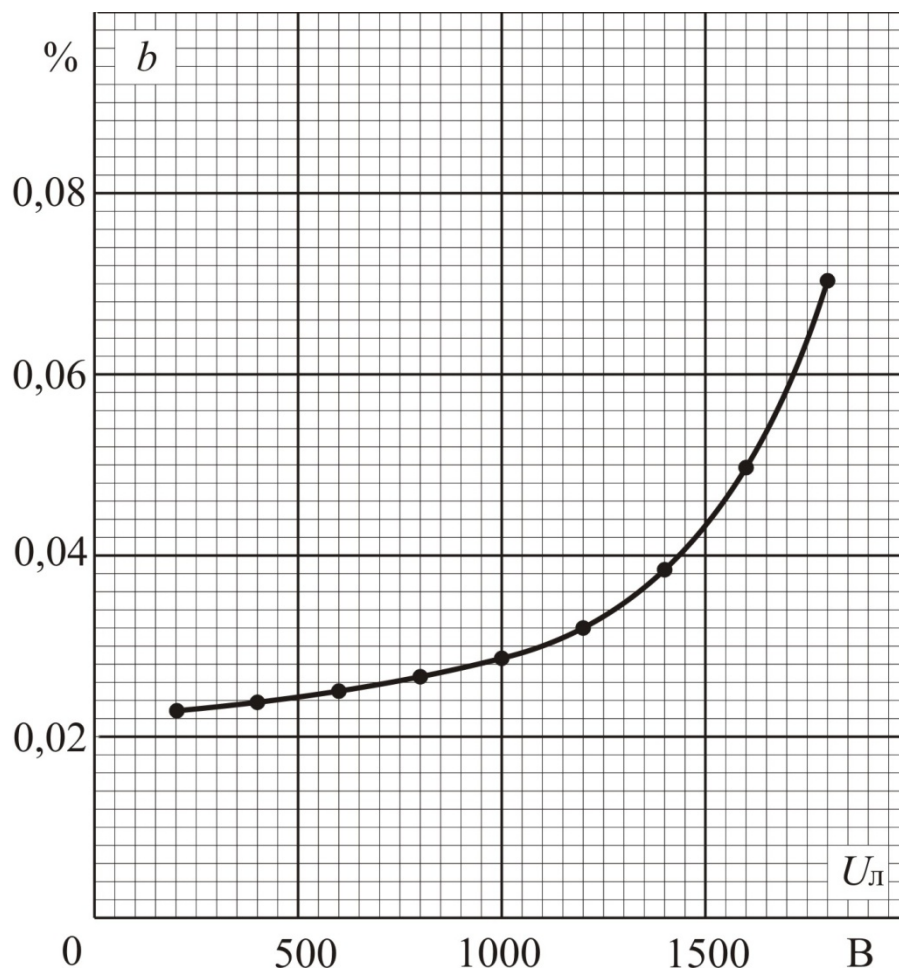


Рисунок 3.3.1 – Залежність похибки від величини напруги, що виникає при застосуванні спрощення

Магнітний потік визначається за формулою [4]

$$\Phi = \frac{E_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot k_{o\phi} \cdot w_1 \cdot f_1} \quad (3.3.6)$$

де $k_{o\phi}$ – обмоточний коефіцієнт;

w_1 – число витків в обмотці фаз;

f_1 – частота струму статора.

Обмоточний коефіцієнт визначається як [2]

$$k_{об} = k_p \cdot k_y \quad (3.3.7)$$

де k_p, k_y – відповідно коефіцієнти розподілення і укорочення обмотки статора.
Коефіцієнт укорочення [2]

$$k_y = \sin \beta \frac{\pi}{2}, \quad (3.3.8)$$

або

$$k_y = \sin 90^\circ \beta, \quad (3.3.9)$$

де β – відносний крок обмотки, який визначається як [2]

$$\beta = \frac{y}{\tau}, \quad (3.3.10)$$

де y – крок обмотки статора (у пазах);
 τ – полюсне ділення статора (у пазах).
Полюсне ділення [2]

$$\tau = \frac{z_1}{2p}, \quad (3.3.11)$$

де z_1 – число пазів статора;
 $2p$ – число полюсів.
У нашому випадку

$$\tau = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12 \text{ паз.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Крок обмотки по пазам $y = 10$.

Відповідно коефіцієнт укорочення [2]

$$k_y = \sin 90^\circ \frac{10}{12} = 0,9659$$

Коефіцієнт розподілу обмотки [2]

$$k_p = \frac{\sin(0,5 \cdot \alpha)}{q \cdot \sin \frac{\alpha}{2 \cdot q}}, \quad (3.3.12)$$

де α – фазна зона обмотки,
 q – число пазів на полюс і фазу.

Фазна зона обмотки [2]

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot q}{z_1}. \quad (3.3.13)$$

Так як за вихідними даними $p=3$, $q=4$, а $z_1=72$, то

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot 3 \cdot 4}{72} = \frac{\pi}{3} = 60^\circ.$$

Отже

$$k_p = \frac{\sin 30^\circ}{4 \cdot \sin 7,5^\circ} = 0,9577.$$

						Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, для нашого випадку, обмоточний коефіцієнт згідно формули (3.3.7)

$$k_{об} = 0,9659 \cdot 0,9577 = 0,925.$$

Магнітний потік при $E_1 = 337,76$ В і $f_1 = 50$ Гц

$$\Phi = \frac{337,79}{3,14 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,925 \cdot 48 \cdot 50} = 0,0343 \text{ Вб}.$$

Розрахувавши для приведених в таблиці 3.2.1 значень $U_{л}$ е.р.с. E_1 і магнітний потік Φ отримаємо приведені на рисунку 3.3.2 залежності $x_m(\Phi)$ та $x_{mn}(\Phi)$ для частоти первинного струму 50 Гц та 55,9 Гц.

В подальших розрахунках замість $x_{mn}(\Phi)$ будемо використовувати залежність $x_{mn}^*(\Phi^*)$, де x_{mn}^* , Φ^* - значення опору x_{mn} та магнітного потоку Φ у відносних одиницях, тобто визначених як [4]

$$\Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_H}. \quad (3.3.14)$$

$$x_{mn}^* = \frac{x_{mn}}{x_{mnH}}. \quad (3.3.15)$$

де Φ_H , x_{mnH} значення Φ і x_m у режимі номінального навантаження.

У режимі номінального навантаження $U_1 = 1870$ В, $I_1 = 450$ А, тому е.р.с.

$$E_{1H} = U_1 - I_{1л} \sqrt{r_1^2 + x_{1H}^2}, \quad (3.3.16)$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

$$E_{1н} = \frac{1870}{\sqrt{3}} - 450\sqrt{0,0344^2 + 0,238^2} = 971,37 \text{ В.}$$

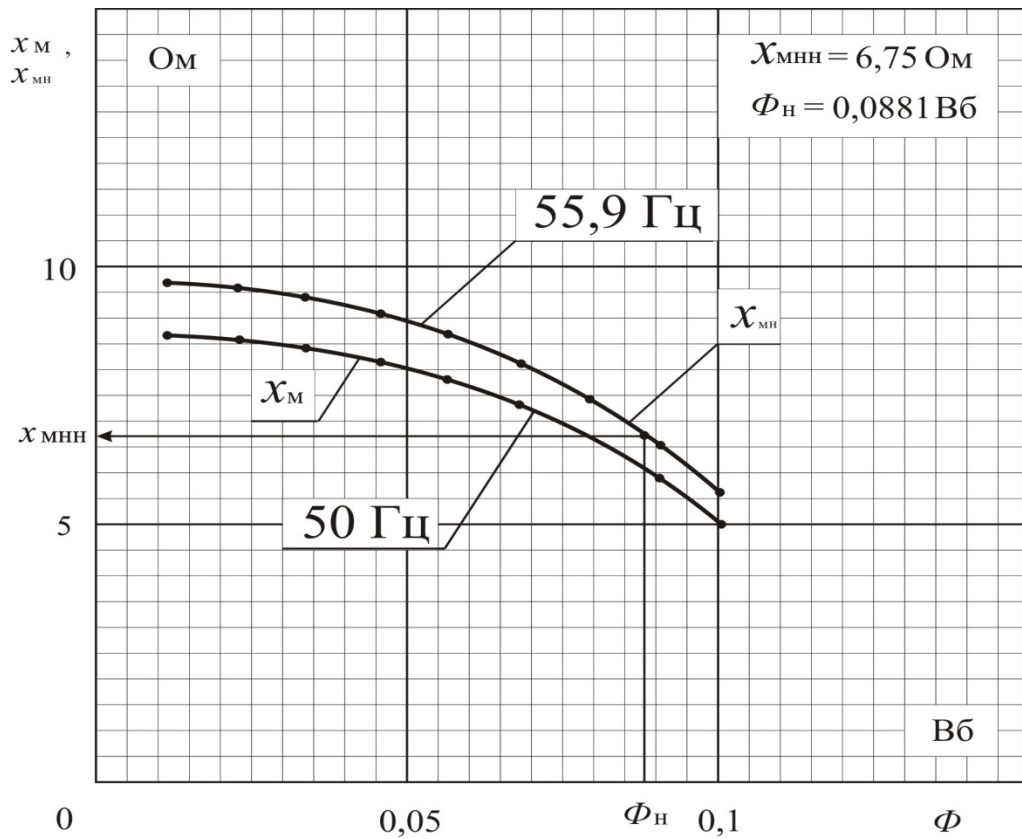


Рисунок 3.3.2 – Залежність індуктивного опору вітки намагнічування від магнітного потоку

Магнітний потік

$$\Phi_n = \frac{971,37}{\pi\sqrt{2} \cdot 0,925 \cdot 48 \cdot 55,9} \cong 0,0881 \text{ Вб.} \quad (3.3.17)$$

На рисунку 3.3.3 для $\Phi_n = 0,0881 \text{ Вб}$ знаходимо

$$x_{мнн} = 6,75 \text{ Ом.}$$

Розрахунок приведемо в таблиці 3.3.1, а графік залежності $x^*_{\text{мн}}(\Phi^*)$ приведемо на рисунку 3.3.3.

Таблиця 3.3.1 – Розрахунок залежності $x^*_{\text{мн}}(\Phi^*)$ у відносних одиницях

Вихідні дані		Результати розрахунку	
Φ	$x_{\text{мн}}$	Φ^*	$x_{\text{мн}}^*$
Вб	Ом	Вб	Ом
0,0114	9,689	0,129	1,435
0,0228	9,687	0,259	1,433
0,0343	9,441	0,389	1,399
0,0456	8,819	0,518	1,307
0,0569	8,602	0,646	1,274
0,0683	8,366	0,775	1,239
0,0794	7,168	0,901	1,129
0,0904	6,645	1,026	0,984
0,1010	5,570	1,146	0,825

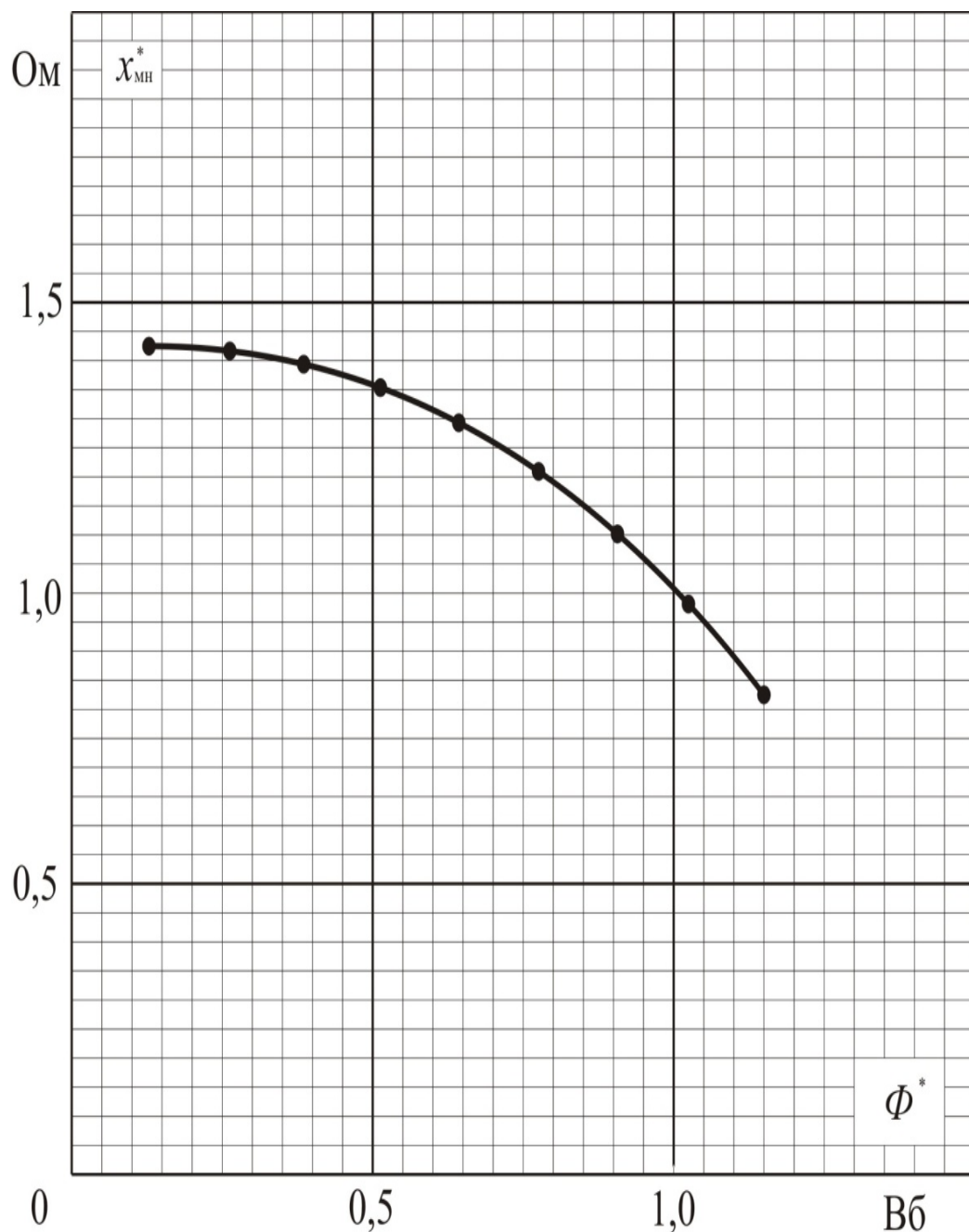


Рисунок 3.3.3 – Залежність індуктивного опору вітки намагнічування від магнітного потоку у відносних одиницях

Як видно із рисунку 3.3.4 при зростанні магнітного потоку має місце значне зменшення r_{mh} . Визначимося з причиною цього, так як у цьому випадку реальні втрати у сталі статора повинні збільшуватися.

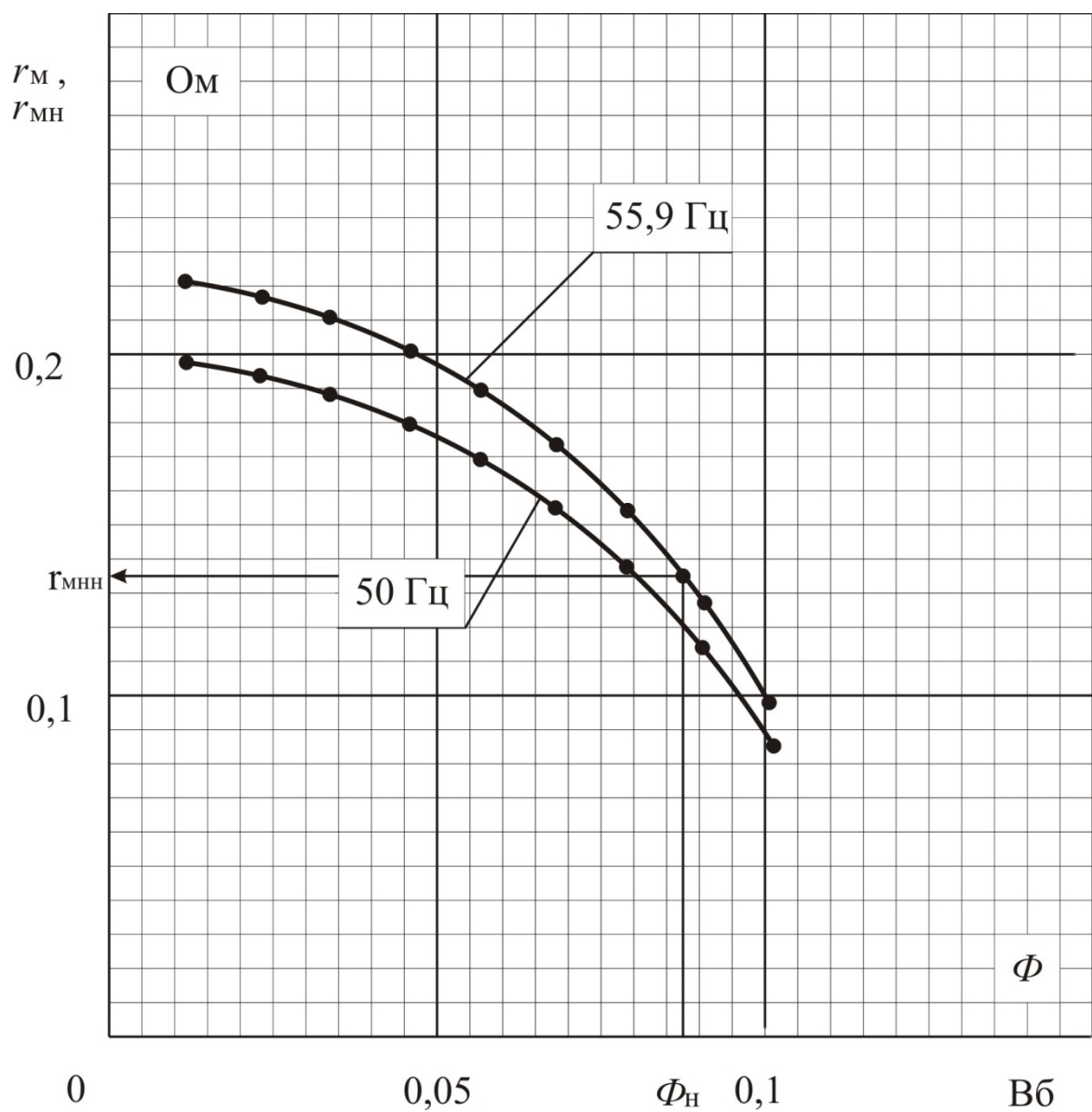


Рисунок 3.3.4 – Залежність активного опору вітки намагнічування від магнітного потоку

На рисунку 3.3.4 для $\Phi_H = 0,0881$ Вб знаходимо

$$r_{MH} = 0,135 \text{ Ом.}$$

Розглянемо приведену на рисунку 3.3.5 схему заміщення, в якій намагнічуюча вітка представлена у вигляді головного індуктивного опору $x_{Г1}$, паралельно якому для врахування втрат у сталі включено опір r_c . Неважко спостерігати, що

$$r_c I_{0a} = x_{Г1} I_{0p} = E_1, \quad (3.3.18)$$

де I_{0a}, I_{0p} – відповідно активна і реактивна складові струму холостого ходу.

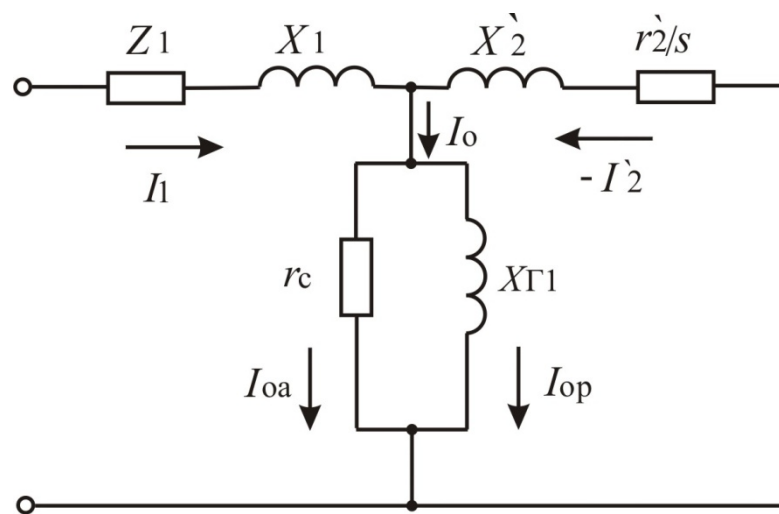


Рисунок 3.3.5 – Еквівалентна схема заміщення асинхронної машини з розгалуженою віткою намагнічування

Таким чином, опір[2]

$$r_c = \frac{m_1 E_1^2}{p_c}. \quad (3.3.19)$$

Розраховані за експериментальними даними залежності $r_c(E)$ та $r_c(\Phi)$ приведені в таблиці 3.2.1.

На основі рисунку 3.3.5 комплексний опір кола намагнічування для схеми заміщення, що показано на рисунку 2.1, визначається як [2]

$$r_m + jx_m = \frac{jx_{e1}r_c}{r_c + jx_{e1}} = \frac{j(x_{e1})(r_c - jx_{e1})}{r_c^2 + x_{e1}^2}. \quad (3.3.20)$$

Звідки маємо

$$r_m = R_e(r_m + jx_m), \quad (3.3.21)$$

або

$$r_m = \frac{x_{e1}^2 r_c}{r_c^2 + x_{e1}^2}, \quad (3.3.22)$$

$$x_m = I_m(r_m + jx_m), \quad (3.3.23)$$

$$x_m = \frac{x_{e1}r_c^2}{r_c^2 + x_{e1}^2}. \quad (3.3.24)$$

З даних таблиці 3.2.1 бачимо, що $r_c \gg x_{e1}$, тому вважаючи $r_c^2 + x_{e1}^2 \approx r_c^2$ отримаємо

$$x_m \cong x_{e1}; \quad r_m \cong \frac{x_{e1}^2}{r_c} \cong \frac{x_m^2}{r_c}. \quad (3.3.25)$$

Допустимість такого спрощення підтвердимо розрахунками для досліду холостого ходу при $I_0=40$ А (див. рисунок 3.2.2).

Як видно з таблиці 3.2.1 при $I_0=40$ А маємо $E_1=337,788$ В, $p_c=900$ Вт, тому

$$r_c = \frac{3 \cdot 337,79^2}{900} = 380,34 \text{ Ом.}$$

						Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Активна складова струму холостого ходу[2]

$$I_{0a} = \frac{E_1}{r_c}, \quad (3.3.26)$$

$$I_{0a} = \frac{337,79}{380,34} = 0,8881 \text{ A.}$$

Реактивна складова струму холостого ходу [2]

$$I_{0p} = \sqrt{I_0^2 - I_{0a}^2}, \quad (3.3.27)$$

$$I_{0p} = \sqrt{40^2 - 0,8881^2} = 39,99 \text{ A.}$$

Головний індуктивний опір[2]

$$x_{\Sigma 1} = \frac{E_1}{I_{0p}}, \quad (3.3.28)$$

$$x_{\Sigma 1} = \frac{337,79}{39,99} = 8,45 \text{ Ом.}$$

Значення r_{Σ}, x_{Σ} визначимо за спрощеними формулами

$$r_{\Sigma} = \frac{8,45^2}{380,34} = 0,1877 \text{ Ом.}$$

$$x_{\Sigma} \cong x \cong 8,45 \text{ Ом.}$$

						Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняння отриманих значень та r_m , x_m з приведеними у таблиці 3.2.1 дає представлення про похибки, що вносяться в розрахунок при використанні спрощених формул. Показані вирази показують, що головною причиною зниження r_m при зростанні магнітного потоку є спосіб його визначення.

На рисунку 3.3.6 покажемо інтенсивність зниження опору r_c із ростом магнітного потоку Φ .

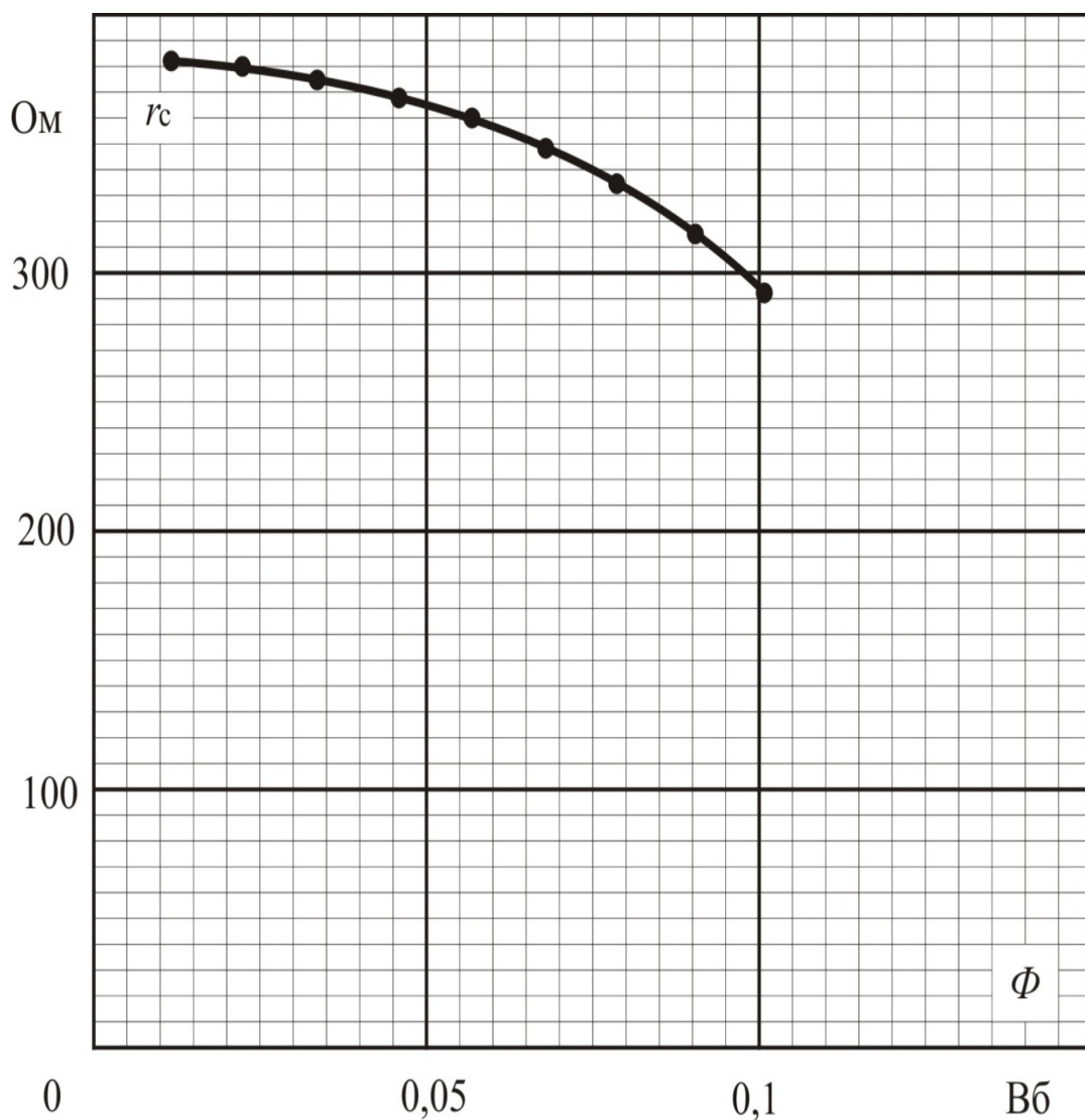


Рисунок 3.3.6 – Залежність опору r_c вітки намагнічування від магнітного потоку Φ

У результаті проведених розрахунків можна сказати, що параметри еквівалентної схеми заміщення асинхронної машини не є постійними, а залежать від режиму роботи. Це обумовлено:

- впливом робочих режимів машини на ступінь насичення її магнітної системи, з ростом якої зменшуються значення опорів кола намагнічування схеми заміщення r_{mn} і r_{mn} ;
- залежністю ступеня насичення зубців зони сердечників статора і ротора від величини струму в обмотках: при помітному насиченні зубців зони з ростом струму індуктивність розсіяння обмоток і опору x_1 схеми заміщення зменшуються.

						Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 Методика визначення робочих та електротягових характеристик

4.1 Визначення поняття робочих характеристик

Робочими характеристиками асинхронного електричного двигуна загальнопромислового призначення називають залежності $P_1(P_2)$, $I_1(P_2)$, $\cos\varphi_1(P_2)$, $M_2(P_2)$, $s(P_2)$ та $\eta(P_2)$ при роботі з номінальною напругою і частотою, де P_1 – споживана потужність, I_1 – первинний струм статора, $\cos\varphi_1$ – коефіцієнт потужності, M_2 – момент на валу, s – ковзання, η – коефіцієнт корисної дії.

Робочі характеристики встановлюють для асинхронних машин, які працюють від джерела живлення зі статичною напругою та частотою струму статора. Але для частотно-регульованих двигунів також у більшості випадків виробники приводять такі характеристики, оскільки вони також можуть бути використані в ряді розрахунків. Для прикладу на рисунку 4.1.1 приведені робочі характеристики тягового двигуна НБ -607, виробництва НЕВЗ [2].

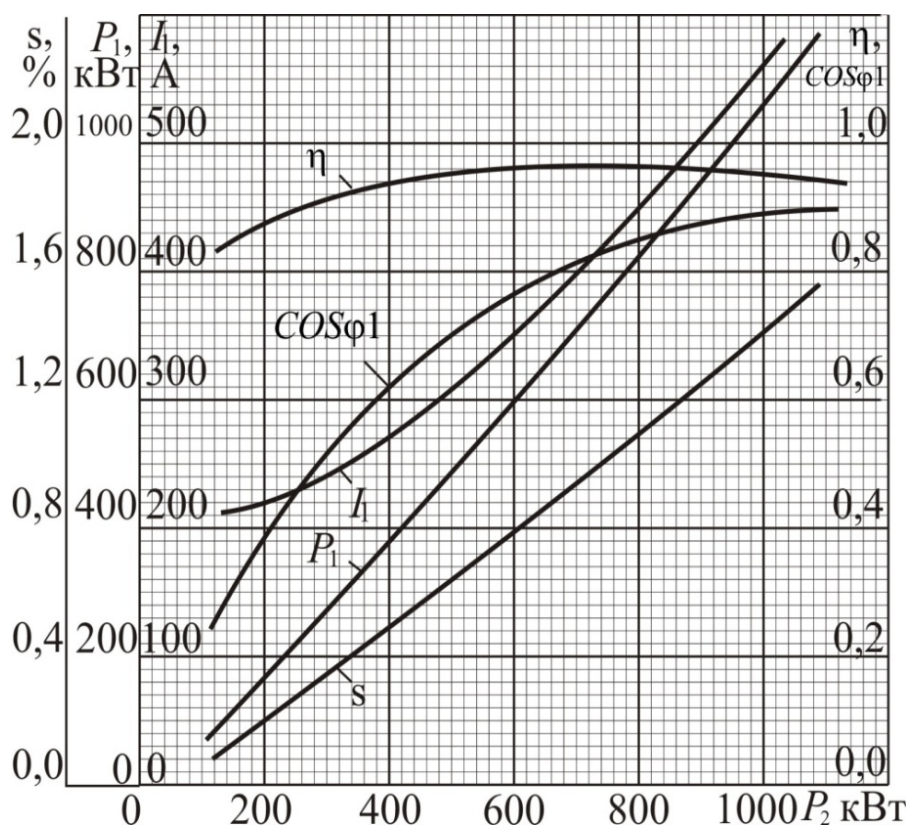


Рисунок 4.1.1 - Робочі характеристики тягового двигуна НБ -607

Як відомо [8], розрахунок характеристик двигунів, які працюють при незмінних напрузі та частоті первинної обмотки, не враховують зміну ступеня насичення магнітної системи, так як вони незначні. Таке припущення значно спрощує розрахунки, що дає можливість користуватися круговими діаграмами.

Але у даній роботі маємо за мету розробку методики визначення характеристик частотно-регульованих двигунів, де зміна параметрів схеми заміщення у ряді режимів роботи може бути значною. Тому і методика визначення робочих характеристик будується з урахуванням зміни насичення магнітної системи.

4.2 Методика розрахунку робочих характеристик

Формули для аналітичного розрахунку робочих характеристик складаються на основі еквівалентної схеми заміщення. Для розрахунку характеристик повинні бути відомі параметри еквівалентної схеми заміщення (r_1 , x_{1n} , $r_{mn}(\Phi)$, $x_{mn}(\Phi)$, r_2 , x_{2n}), номінальне значення частоти струму статора f_{1n} і фазної напруги U_{1n} , механічні втрати $p_m(f_1)$ (рисунок 3.2.3).

Розрахунок починають з визначення частоти f_2 або відносного ковзання s , яке відповідає реалізації заданого значення корисної потужності P_2 . За цією метою для кожного із призначених значень потужності P_2 розраховують і будують залежності $U_1(f_2)$, виконавши для ряду значень частоти f_2 . При цьому для кожного значення f_2 значення опорів r_{mn} та x_{mn} визначаємо по кривим $r_{mn}(\Phi)$ та $x_{mn}(\Phi)$, щоб урахувати зміну ступеня насичення магнітного кола машини. Алгоритм розрахунку характеристик приведений на рисунку 4.2.1 [2].

Перш ніж провести розрахунок робочих характеристик необхідно здійснити розрахунки згідно основних співвідношень еквівалентної схеми заміщення асинхронної регульованої частотою асинхронної машини, тобто згідно формул 3.1.1 – 3.1.21 розділу 3. Покажемо цей розрахунок на прикладі одного із випадків, наприклад для $f_1=0,5$ Гц та $P_2=1000$ кВт.

						Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

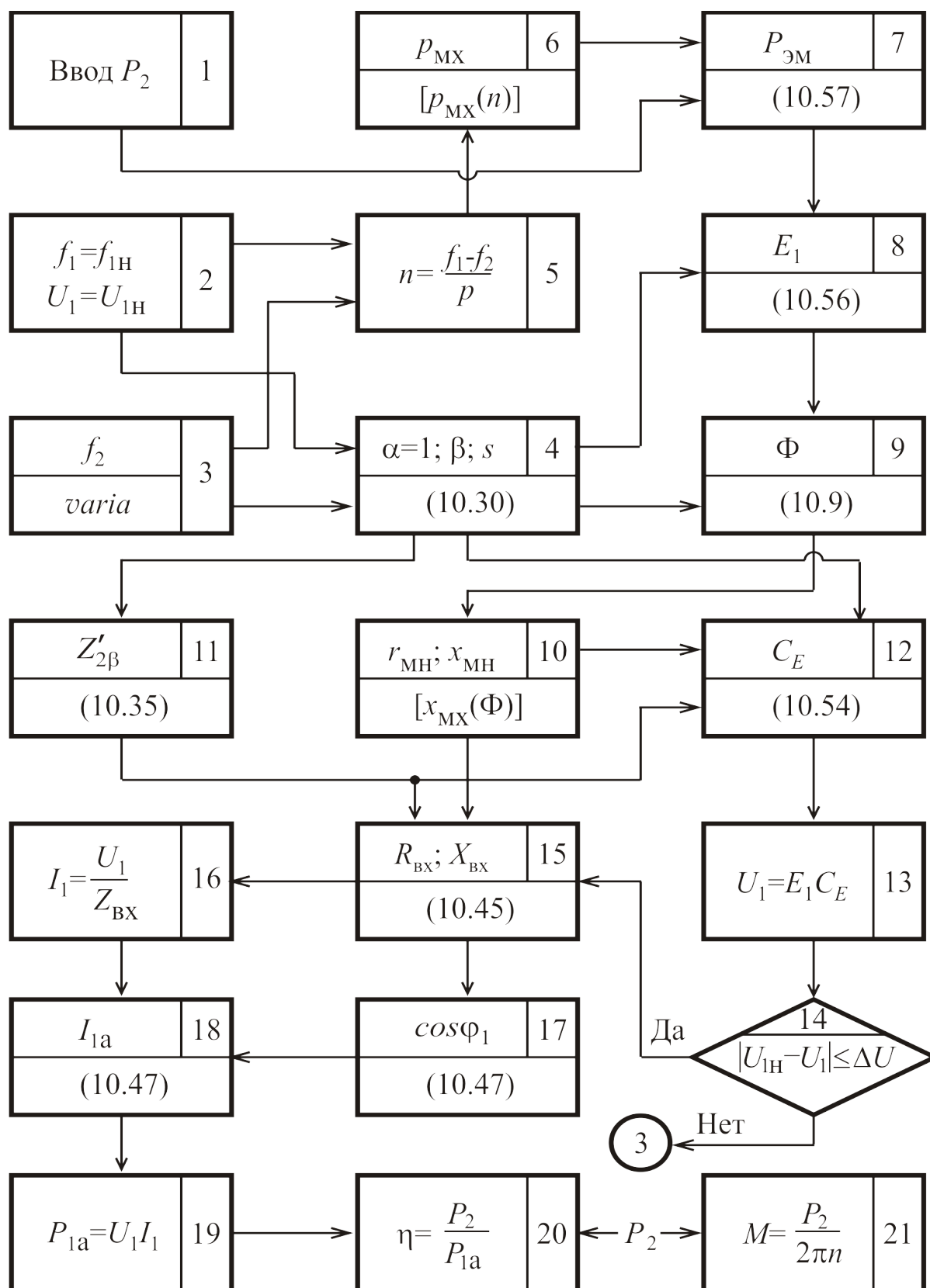


Рисунок 4.2.1 – Схема розрахунку робочих характеристик асинхронного двигуна

Відносна частота струму статора

$$\alpha = \frac{55,9}{55,9} = 1.$$

Відносна частоту струму ротора

$$\beta = \frac{0,5}{55,9} = 0,0089.$$

Індуктивний опір намагнічуючого кола x_m

$$r_m = 1 \cdot 0,185 = 0,185$$

$$x_m = 1 \cdot 8,602 = 8,602$$

$x_{mh}=6,75$ Ом, $r_{mh}=0,137$ Ом – візьмемо із рисунку 3.3.2 та 3.3.4 відповідно.

Модулі комплексного опору фази обмотки статора, обмотки ротора (приведені до первинного кола) та намагнічуючого кола визначимо на основі рисунку 3.1.2 а).

$$z_{1\alpha} = \sqrt{\left(\frac{0,0344}{1}\right)^2 + (0,238)^2} = 0,240 \text{ Ом.}$$

$$z'_{2\beta} = \sqrt{\left(\frac{0,0275}{0,0089}\right)^2 + (0,180)^2} = 3,08 \text{ Ом.}$$

$$z_{mh} = \sqrt{0,120^2 + 6,30^2} = 6,301 \text{ Ом.}$$

Знайдемо значення модулю опору $z_{2e\beta}$ для чого необхідно спочатку знайти

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

$$R_{2e\beta} = \frac{(3,08)^2 \cdot 0,120 + 6,301^2 \cdot \frac{0,0275}{0,0089}}{51,95} = 2,372 \text{ Ом.}$$

$$x_{2e\beta} = \frac{(3,08)^2 \cdot 0,120 + 6,301^2 \cdot 0,180}{51,95} = 1,288 \text{ Ом.}$$

Отже

$$z_{2e\beta}^2 = 2,372^2 + 1,288^2 = 7,284 \text{ Ом.}$$

Квадрат модуля комплексного опору $z_{2.m\beta}$ рівний

$$z_{2.m\beta}^2 = \left(\frac{0,0275}{0,0089} + 0,120\right)^2 + (0,161 + 6,30)^2 = 51,95 \text{ Ом.}$$

Вхідний опір фази z_{ex} при номінальній частоті струму статора

$$R_{ex} = \frac{0,0344}{1} + 2,372 = 2,406 \text{ Ом.}$$

$$x_{ex} = 0,238 + 1,288 = 1,526 \text{ Ом.}$$

$$z_{ex} = \sqrt{2,406^2 + 1,526^2} = 2,849 \text{ Ом.}$$

Значення електрорушійної сили E_1

$$E_1 = 3,08 \sqrt{\frac{1019,12 \cdot 1 \cdot 0,0089 \cdot 10^3}{3 \cdot 0,0275}} = 1023,72 \text{ В.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Знайдемо величину магнітного потоку

$$\Phi = \frac{1023,72}{3,14 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,925 \cdot 48 \cdot 1 \cdot 55,9} = 0,093 \text{ Вб.}$$

Значення фазної напруги U_1

$$C_{EA} = \frac{2,372 \cdot 2,406 + 1,288 \cdot 1,526}{7,284} = 1,053$$

$$C_{EP} = \frac{2,372 \cdot 1,526 - 1,288 \cdot 2,406}{7,284} = 0,071$$

$$C_E = \sqrt{1,053^2 + 0,071^2} = 1,057.$$

Отже

$$U_1 = 1,057 \cdot 1023,72 = 1080,74 \text{ В.}$$

Частоту обертання ротора знайдемо як [4]

$$n = \frac{60}{p} \cdot (f_1 - f_2), \quad (4.2.1)$$

$$n = \frac{60}{3} \cdot (55,9 - 0,5) = 1108 \text{ об/хв.}$$

Механічна потужність [2]

$$P_{\text{мх}} = P_2 + p_{\text{мх}} + p_{\text{д}} + p_{\text{с2}}, \quad (4.2.2)$$

						Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $p_{\text{мх}}$ – механічні втрати;
 $p_{\text{д}}$ – додаткові втрати;
 $p_{\text{с2}}$ – втрати у сталі ротора.

При розрахунку характеристик тягового двигуна втрати у сталі ротора не враховують, оскільки вони незначні. Враховуючи порівняно невелику величину додаткових втрат, приймемо їх приблизно рівними $0,01P_2$ [9]. Таким чином

$$P_{\text{мх}} = 1,01(P_2 + p_{\text{мх}}), \quad (4.2.3)$$

де $p_{\text{мх}} = 1,025$ кВт

$$P_{\text{мх}} = 1,01(1000 + 1,025) = 1010,001 \text{ кВт.}$$

Взаємозв'язок розвиваючої на роторі асинхронної машини електромагнітної потужності $P_{\text{ем}}$ і механічної потужності $P_{\text{мх}}$, представимо виразом [2]

$$P_{\text{ем}} = P_{\text{мх}} \frac{1}{1-s} \quad \text{або} \quad P_{\text{ем}} = P_{\text{мх}} \frac{\alpha}{\alpha - \beta}. \quad (4.2.4)$$

$$P_{\text{ем}} = \frac{1 \cdot 1010,001}{1 - 0,0089} = 1019,12 \text{ кВт.}$$

Аналогічні розрахунки приведемо у таблицях 4.2.1 – 4.2.5 для значень $P_2 = 400 - 1200$ кВт та різних значень частоти f_2 .

По даним таблиць 4.2.1 – 4.2.5 будемо графік залежності $f_2(U_1)$ рисунок 4.2.2, із якого знаходимо дійсні значення f_2 . У таблиці 4.2.6 приведемо аналогічний вищенаведеному розрахунок для цих значень f_2 . На рисунку 4.2.3 покажемо залежність росту частоти ротора f_2 від корисної потужності P_2 .

						Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2.1 – Розрахунок $U_1(f_2)$ за заданим значенням $P_2 = 400$ кВт

Розрахункова величина та формула	№ формул и	Одиниці вимірювання	f_2 , Гц									
			0,15	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}$	3.1.1	-	1									
$\beta = \frac{f_2}{f_{1н}}$	3.1.2	-	0,0027	0,0089	0,0134	0,0179	0,0224	0,0268	0,0313	0,0358	0,040	0,044
$n = \frac{60 \cdot (f_1 - f_2)}{p}$	4.2.1	об/хв	1115	1108	1103	1098	1093	1088	1083	1078	1073	1068
p_m - по $p_m(f_1)$	Рис. 3.2.3	кВт	1,025									
$P_{мх} = 1,01 \cdot (P_2 + p_m)$	4.2.3	кВт	404,001									
$P_{ем} = \frac{\alpha \cdot P_{мх}}{\alpha - \beta}$	4.2.4	кВт	405,09	407,65	409,50	411,36	413,24	415,14	417,06	418,99	420,9	422,9
$z_{2\beta}' = \sqrt{\left(\frac{r_2'}{\beta}\right)^2 + (x_{2н}')^2}$	3.1.6	Ом	10,25	3,08	2,06	1,55	1,24	1,04	0,90	0,79	0,71	0,64
$E_1 = z_{2\beta}' \cdot \sqrt{\frac{10^3 \cdot P_{ем} \cdot \alpha \cdot \beta}{m_1 \cdot r_2'}}$	3.1.16	В	1176,5 4	647,46	530,97	462,25	415,97	382,35	356,72	336,51	320,19	306,78
$\Phi = \frac{E_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot k_{об} \cdot w_1 \cdot \alpha \cdot f_{1н}}$	3.1.17	Вб	0,107	0,059	0,048	0,042	0,038	0,035	0,032	0,031	0,029	0,028

Продовження таблиці 4.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$r_{\text{мн}} - \text{по } r_{\text{мн}}(\Phi)$	Рис. 3.3.5	Ом	0,087	0,187	0,098	0,205	0,208	0,210	0,202	0,203	0,204	0,206
$x_{\text{мн}} - \text{по } x_{\text{мн}}(\Phi)$	Рис. 3.3.3	Ом	5,0	8,6	9,0	9,3	9,35	9,4	9,45	9,5	9,505	9,51
$z_{1\alpha} = \sqrt{\left(\frac{r_1}{\alpha}\right)^2 + x_{1\text{н}}^2}$	3.1.5	Ом	0,240									
$z_{\text{мн}} = \sqrt{r_{\text{мн}}^2 + x_{\text{мн}}^2}$	3.1.7	Ом	5,001	8,602	9,002	9,302	9,352	9,402	9,452	9,502	9,507	9,512
$z_{2\text{м}\beta}^2 = \left(\frac{r_2'}{\beta} + r_{\text{мн}}\right)^2 + (x_2' + x_{\text{мн}})^2$	3.1.12	Ом ²	133,46	87,39	88,98	92,526	92,546	92,938	93,539	94,279	94,219	94,202
$R_{2e\beta} = \frac{\left(z_{2\beta}^2 \cdot r_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta}\right)}{z_{2\text{м}\beta}^2}$	3.1.10	Ом	1,989	2,623	1,876	1,443	1,166	0,977	0,841	0,737	0,657	0,592
$x_{2e\beta} = \frac{z_{2\beta}^2 \cdot x_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot x_{2\text{н}}'}{z_{2\text{м}\beta}^2}$	3.1.11	Ом	3,97	1,086	0,592	0,409	0,326	0,281	0,253	0,235	0,223	0,214
$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2$	3.1.9	Ом ²	19,716	8,062	3,871	2,249	1,466	1,034	0,771	0,599	0,481	0,396
$R_{\text{ex}} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta}$	3.1.14	Ом	2,023	2,658	1,911	1,477	1,200	1,012	0,875	0,772	0,691	0,626
$x_{\text{ex}} = x_{1\text{н}} + x_{2e\beta}$	3.1.15	Ом	4,208	1,324	0,830	0,647	0,564	0,519	0,491	0,473	0,461	0,452
$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{\text{ex}} + x_{2e\beta} \cdot x_{\text{ex}}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.20	-	1,051	1,043	1,053	1,065	1,080	1,097	1,116	1,136	1,157	1,180
$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{\text{ex}} - x_{2e\beta} \cdot R_{\text{ex}}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.21	-	0,017	0,073	0,110	0,146	0,182	0,216	0,248	0,279	0,309	0,337

Продовження таблиці 4.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,052	1,046	1,059	1,074	1,096	1,118	1,143	1,170	1,198	1,228
$\gamma = \arccos\left(\frac{C_{EA}}{C_{EP}}\right)$			1,77	4,0	6,0	7,97	9,65	11,15	12,46	13,77	15,02	16,02
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	В	1237,17	677,11	562,21	497,10	455,69	427,52	407,71	393,59	383,57	376,55

Таблиця 4.2.2 – Розрахунок $U_1(f_2)$ за заданим значенням $P_2 = 600$ кВт

Розрахункова величина та формула	№ формули	Одиниці вимірювання	f_2 , Гц									
			0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\alpha = \frac{f_1}{f_{1H}}$	3.1.1	-	1									
$\beta = \frac{f_2}{f_{1H}}$	3.1.2	-	0,0045	0,0089	0,0134	0,0179	0,0224	0,0268	0,0313	0,0358	0,0403	0,0447
$n = \frac{60 \cdot (f_1 - f_2)}{p}$	4.2.1	об/хв	1113	1108	1103	1098	1093	1088	1083	1078	1073	1068
p_m - по $p_m(f_1)$	Рис. 3.2.3	кВт	1,025									
$P_{MX} = 1,01 \cdot (P_2 + p_m)$	4.2.3	кВт	606,001									
$P_{em} = \frac{\alpha \cdot P_{MX}}{\alpha - \beta}$	4.2.4	кВт	608,72	611,47	614,24	617,04	619,86	622,71	625,59	628,49	631,42	634,37

Продовження таблиці 4.2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2$	3.1.9	Ом ²	14,419	7,815	3,847	2,240	1,463	1,033	0,770	0,599	0,481	0,396
$R_{ex} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta}$	3.1.14	Ом	2,420	2,579	1,899	1,471	1,198	1,010	0,874	0,771	0,691	0,626
$x_{ex} = x_{1н} + x_{2e\beta}$	3.1.15	Ом	3,192	1,396	0,846	0,656	0,568	0,521	0,493	0,474	0,461	0,452
$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{ex} + x_{2e\beta} \cdot x_{ex}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.20	-	1,054	1,046	1,054	1,066	1,081	1,098	1,116	1,136	1,158	1,180
$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{ex} - x_{2e\beta} \cdot R_{ex}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.21	-	0,032	0,072	0,110	0,146	0,182	0,216	0,248	0,279	0,309	0,337
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,055	1,049	1,060	1,077	1,096	1,119	1,144	1,170	1,198	1,228
$\gamma = \arccos\left(\frac{C_{EA}}{C_{EP}}\right)$			2,49	4,3	6,1	8,0	9,55	11,01	12,70	13,85	14,87	16,07
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	В	1178,88	831,80	689,34	609,44	558,44	523,84	499,56	482,15	469,83	461,22

Таблиця 4.2.3 – Розрахунок $U_1(f_2)$ за заданим значенням $P_2 = 800$ кВт

Розрахункова величина та формула	№ формули	Одиниці вимірювання	f_2 , Гц									
			0,3	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}$	3.1.1	-	1									
$\beta = \frac{f_2}{f_{1н}}$	3.1.2	-	0,0054	0,0089	0,0134	0,0179	0,0224	0,0268	0,0313	0,0358	0,0403	0,0447

Змн.		
Арк.		
№ докум.		
Підпис		
Дата		
63		

Продовження таблиці 4.2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$n = \frac{60 \cdot (f_1 - f_2)}{p}$	4.2.1	об/хв	1112	1108	1103	1098	1093	1088	1083	1078	1073	1068
p_m - по $p_m(f_1)$	Рис. 3.2.3	кВт	1,025									
$P_{mx} = 1,01 \cdot (P_2 + p_m)$	4.2.3	кВт	808,001									
$P_{em} = \frac{\alpha \cdot P_{mx}}{\alpha - \beta}$	4.2.4	кВт	812,36	815,29	818,99	822,72	826,48	830,28	834,11	628,49	841,89	845,83
$z_{2\beta}' = \sqrt{\left(\frac{r_2'}{\beta}\right)^2 + (x_{2H}')^2}$	3.1.6	Ом	5,13	3,08	2,06	1,55	1,24	1,04	0,90	0,79	0,71	0,64
$E_1 = z_{2\beta}' \cdot \sqrt{\frac{10^3 \cdot P_{em} \cdot \alpha \cdot \beta}{m_1 \cdot r_2'}}$	3.1.16	В	1178,67	915,64	750,91	653,72	588,27	540,72	504,47	412,13	452,81	433,85
$\Phi = \frac{E_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot k_{об} \cdot w_1 \cdot \alpha \cdot f_{1H}}$	3.1.17	Вб	0,107	0,083	0,068	0,059	0,053	0,049	0,046	0,043	0,041	0,039
r_{mH} - по $r_{mH}(\Phi)$	Рис.3.3.4	Ом	0,085	0,145	0,183	0,188	0,192	0,198	0,200	0,204	0,205	0,207
x_{mH} - по $x_{mH}(\Phi)$	Рис.3.3.2	Ом	5,0	7,1	8,1	8,6	8,7	9,0	9,1	9,3	9,35	9,4
$z_{1\alpha} = \sqrt{\left(\frac{r_1}{\alpha}\right)^2 + x_{1H}^2}$	3.1.5	Ом	0,240									
$z_{mH} = \sqrt{r_{mH}^2 + x_{mH}^2}$	3.1.7	Ом	5,001	7,102	8,102	8,602	8,702	9,002	9,102	9,302	9,352	9,402
$z_{2m\beta}^2 = \left(\frac{r_2'}{\beta} + r_{mH}\right)^2 + (x_2' + x_{mH})^2$	3.1.12	Ом ²	53,771	63,087	73,229	79,756	80,539	85,419	86,929	90,457	91,248	92,088

Змн.		
Арк.		
№ докум.		
Підпис		
Дата		
64	.	

Продовження таблиці 4.2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$R_{2e\beta} = \frac{\left(z_{2\beta}'^2 \cdot r_{mn} + z_{mn}^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta} \right)}{z_{2m\beta}^2}$	3.1.10	Ом	2,425	2,480	1,848	1,432	1,160	0,975	0,839	0,737	0,656	0,591
$x_{2e\beta} = \frac{z_{2\beta}'^2 \cdot x_{mn} + z_{mn}^2 \cdot x_{2n}'}{z_{2m\beta}^2}$	3.1.11	Ом	2,528	1,211	0,630	0,425	0,336	0,285	0,256	0,236	0,224	0,215
$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2$	3.1.9	Ом ²	12,271	7,615	3,811	2,232	1,459	1,031	0,769	0,599	0,480	0,396
$R_{ex} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta}$	3.1.14	Ом	2,459	2,514	1,882	1,467	1,194	1,009	0,873	0,771	0,690	0,626
$x_{ex} = x_{1n} + x_{2e\beta}$	3.1.15	Ом	2,766	1,449	0,868	0,663	0,574	0,523	0,494	0,474	0,462	0,453
$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{ex} + x_{2e\beta} \cdot x_{ex}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.20	-	1,056	1,049	1,056	1,067	1,082	1,098	1,117	1,136	1,158	1,180
$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{ex} - x_{2e\beta} \cdot R_{ex}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.21	-	0,040	0,072	0,110	0,146	0,181	0,215	0,248	0,279	0,309	0,337
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,057	1,052	1,062	1,077	1,097	1,119	1,144	1,170	1,198	1,228
$\gamma = \arccos\left(\frac{C_{EA}}{C_{EP}}\right)$			2,49	4,33	6,09	7,81	9,49	11,12	12,47	13,85	14,85	16,07
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	В	1245,37	962,83	797,23	704,31	645,50	605,17	577,04	556,85	524,62	532,64

Таблиця 4.2.4 – Розрахунок $U_1(f_2)$ за заданим значенням $P_2 = 1000$ кВт

Розрахункова величина та формула	№ формул и	Одиниці вимірювання	f_2 , Гц									
			0,45	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}$	3.1.1	-	1									
$\beta = \frac{f_2}{f_{1н}}$	3.1.2	-	0,0081	0,0089	0,0134	0,0179	0,0224	0,0268	0,0313	0,0358	0,040	0,044
$n = \frac{60 \cdot (f_1 - f_2)}{p}$	4.2.1	об/хв	1109	1108	1103	1098	1093	1088	1083	1078	1073	1068
$p_{\text{м}}$ - по $p_{\text{м}}(f_1)$	Рис. 3.2.3	кВт	1,025									
$P_{\text{мх}} = 1,01 \cdot (P_2 + p_{\text{м}})$	4.2.3	кВт	1010,001									
$P_{\text{ем}} = \frac{\alpha \cdot P_{\text{мх}}}{\alpha - \beta}$	4.2.4	кВт	1018,2	1019,1	1023,7	1028,4	1033,1	1037,8	1042,6	1047,4	1052,3 6	1057,2 9
$z_{2\beta}' = \sqrt{\left(\frac{r_2'}{\beta}\right)^2 + (x_{2н}')^2}$	3.1.6	Ом	3,42	3,08	2,06	1,55	1,24	1,04	0,90	0,79	0,71	0,64
$E_1 = z_{2\beta}' \cdot \sqrt{\frac{10^3 \cdot P_{\text{ем}} \cdot \alpha \cdot \beta}{m_1 \cdot r_2'}}$	3.1.16	В	1078,2	1023,7 2	839,54	730,89	657,71	604,55	564,02	532,06	506,3	485,1
$\Phi = \frac{E_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot k_{об} \cdot w_1 \cdot \alpha \cdot f_{1н}}$	3.1.17	Вб	0,098	0,093	0,076	0,066	0,060	0,055	0,051	0,048	0,046	0,044

Змн.		
Арк.		
№ докум.		
Підпис		
Дата		
66		

Продовження таблиці 4.2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$r_{\text{мн}}$ - по $r_{\text{мн}}(\Phi)$	Рис.3.3.4	Ом	0,105	0,120	0,160	0,176	0,185	0,191	0,196	0,198	0,200	0,201
$x_{\text{мн}}$ - по $x_{\text{мн}}(\Phi)$	Рис.3.3.2	Ом	5,80	6,30	7,65	8,25	8,50	8,75	8,95	9,00	9,10	9,15
$z_{1\alpha} = \sqrt{\left(\frac{r_1}{\alpha}\right)^2 + x_{1\text{н}}^2}$	3.1.5	Ом	0,240									
$z_{\text{мн}} = \sqrt{r_{\text{мн}}^2 + x_{\text{мн}}^2}$	3.1.7	Ом	5,801	6,301	7,652	8,252	8,502	8,752	8,952	9,002	9,102	9,152
$z_{2\text{м}\beta}^2 = \left(\frac{r_2'}{\beta} + r_{\text{мн}}\right)^2 + (x_2' + x_{\text{мн}})^2$	3.1.12	Ом ²	47,93	51,95	65,89	73,68	77,02	80,88	84,17	84,86	86,55	87,36
$R_{2e\beta} = \frac{\left(z_{2\beta}^2 \cdot r_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta}\right)}{z_{2\text{м}\beta}^2}$	3.1.10	Ом	2,424	2,372	1,831	1,426	1,158	0,973	0,838	0,735	0,655	0,591
$x_{2e\beta} = \frac{z_{2\beta}'^2 \cdot x_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot x_{2\text{н}}'}{z_{2\text{м}\beta}^2}$	3.1.11	Ом	1,542	1,288	0,651	0,435	0,339	0,288	0,257	0,238	0,225	0,216
$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2$	3.1.9	Ом ²	8,255	7,284	3,779	2,224	1,456	1,030	0,769	0,598	0,480	0,395
$R_{\text{ex}} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta}$	3.1.14	Ом	2,458	2,406	1,866	1,461	1,192	1,007	0,873	0,770	0,690	0,625
$x_{\text{ex}} = x_{1\text{н}} + x_{2e\beta}$	3.1.15	Ом	1,780	1,526	0,889	0,673	0,577	0,526	0,495	0,476	0,463	0,454
$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{\text{ex}} + x_{2e\beta} \cdot x_{\text{ex}}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.20	-	1,055	1,053	1,058	1,069	1,083	1,099	1,117	1,137	1,158	1,181

Таблиця 4.2.5 – Розрахунок $U_1(f_2)$ за заданим значенням $P_2 = 1200$ кВт

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{ex} - x_{2e\beta} \cdot R_{ex}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.21	-	0,063	0,071	0,109	0,146	0,181	0,215	0,248	0,279	0,309	0,337
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,056	1,057	1,063	1,079	1,098	1,120	1,144	1,171	1,199	1,228
$\gamma = \arccos\left(\frac{C_{EA}}{C_{EP}}\right)$			3,53	4,32	5,56	7,81	9,48	11,11	12,47	13,84	15,03	15,90
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	B	1139,16	1080,74	892,73	788,27	722,10	677,02	645,38	623,00	606,98	595,81

[illegible]

Продовження таблиці 4.2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_{em} = \frac{\alpha \cdot P_{mx}}{\alpha - \beta}$	4.2.4	кВт	1222,94	1228,48	1234,08	1239,72	1245,42	1251,17	1256,97	1262,83	12,68,74
$z_{2\beta}' = \sqrt{\left(\frac{r_2'}{\beta}\right)^2 + (x_{2H}')^2}$	3.1.6	Ом	3,08	2,06	1,55	1,24	1,04	0,90	0,79	0,71	0,64
$E_1 = z_{2\beta}' \cdot \sqrt{\frac{10^3 \cdot P_{em} \cdot \alpha \cdot \beta}{m_1 \cdot r_2'}}$	3.1.16	В	1121,43	919,67	800,65	720,48	662,25	617,85	582,85	554,58	531,36
$\Phi = \frac{E_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot k_{об} \cdot w_1 \cdot \alpha \cdot f_{1H}}$	3.1.17	Вб	0,102	0,083	0,073	0,065	0,060	0,056	0,053	0,050	0,048
r_{MH} - по $r_{MH}(\Phi)$	Рис.3.3.4	Ом	0,095	0,145	0,163	0,179	0,185	0,190	0,194	0,197	0,199
x_{MH} - по $x_{MH}(\Phi)$	Рис.3.3.2	Ом	5,40	7,10	7,75	8,25	8,50	8,75	8,9	8,99	9,01
$z_{1\alpha} = \sqrt{\left(\frac{r_1}{\alpha}\right)^2 + x_{1H}^2}$	3.1.5	Ом	0,240								
$z_{MH} = \sqrt{r_{MH}^2 + x_{MH}^2}$	3.1.7	Ом	5,401	7,102	7,752	8,252	8,502	8,752	8,902	8,992	9,012
$z_{2M\beta}^2 = \left(\frac{r_2'}{\beta} + r_{MH}\right)^2 + (x_2' + x_{MH})^2$	3.1.12	Ом ²	40,97	57,54	65,48	72,73	76,48	80,55	83,03	84,52	84,77
$R_{2e\beta} = \frac{\left(z_{2\beta}^2 \cdot r_{MH} + z_{MH}^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta}\right)}{z_{2M\beta}^2}$	3.1.10	Ом	2,211	1,807	1,417	1,155	0,971	0,837	0,735	0,655	0,590

Продовження таблиці 4.2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$x_{2e\beta} = \frac{z_{2\beta}'^2 \cdot x_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot x_{2\text{н}}'}{z_{2\text{м}\beta}^2}$	3.1.11	Ом	1,378	0,680	0,449	0,344	0,290	0,259	0,239	0,225	0,216
$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2$	3.1.9	Ом ²	6,788	3,728	2,209	1,453	1,028	0,768	0,597	0,480	0,395
$R_{\text{ex}} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta}$	3.1.14	Ом	2,245	1,842	1,451	1,190	1,006	0,872	0,769	0,689	0,625
$x_{\text{ex}} = x_{1\text{н}} + x_{2e\beta}$	3.1.15	Ом	1,616	0,918	0,687	0,582	0,528	0,497	0,477	0,463	0,454
$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{\text{ex}} + x_{2e\beta} \cdot x_{\text{ex}}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.20	-	1,060	1,062	1,070	1,084	1,100	1,118	1,137	1,159	1,181
$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{\text{ex}} - x_{2e\beta} \cdot R_{\text{ex}}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.21	-	0,071	0,109	0,146	0,181	0,215	0,248	0,279	0,309	0,337
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,062	1,066	1,080	1,099	1,121	1,145	1,171	1,199	1,229
$\gamma = \arccos\left(\frac{C_{EA}}{C_{EP}}\right)$			3,52	7,00	7,80	9,48	11,11	12,47	13,84	14,84	16,10
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	В	1190,82	980,09	864,93	791,60	742,14	707,32	682,61	665,07	652,87

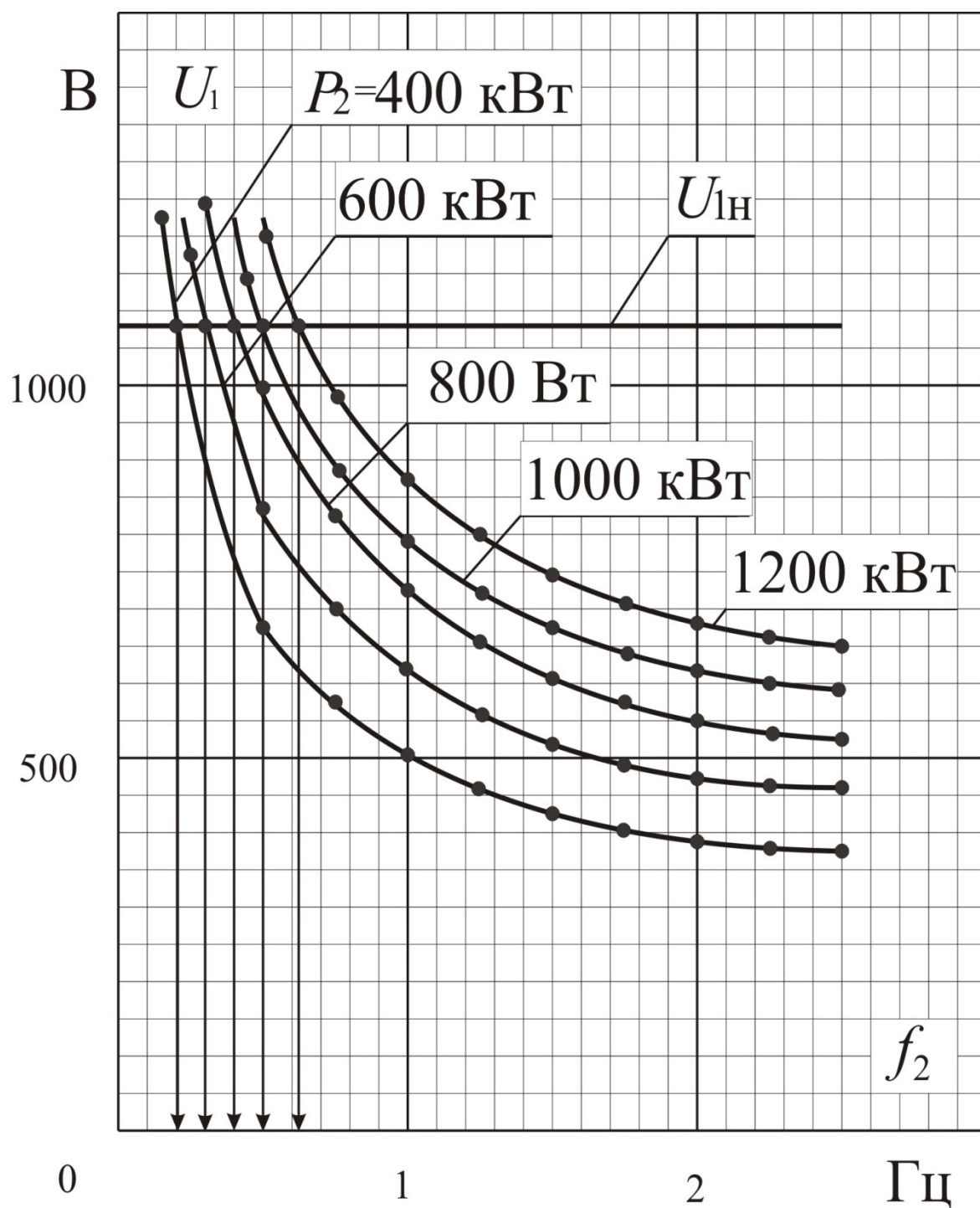


Рисунок 4.2.2 – Залежність напруги статора від частоти ротора при різних значеннях корисної потужності

Таблиця 4.2.6 - Розрахунок робочих характеристик для знайдених значень f_2 із графіку залежності $f_2(U_1)$

Розрахункова величина та формула	Номер формули	Одиниці вимірювання	P_2 кВт				
			400	600	800	1000	1200
1	2	3	4	5	6	7	8
f_2	Рис. 4.1.1	Гц	0,2	0,3	0,4	0,5	0,609
$\alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}$	3.1.1	-	1				
$\beta = \frac{f_2}{f_{1н}}$	3.1.2	-	0,0036	0,0054	0,0072	0,0089	0,0109
$n = \frac{60 \cdot (f_1 - f_2)}{p}$	4.1	об/хв	1114	1112	1110	1108	1105,82
p_m - по $p_m(f_1)$	Рис. 3.2.3	кВт	1,025				
$P_{мх} = 1,01 \cdot (P_2 + p_m)$	4.3	кВт	404,001	606,001	808,001	1010,001	1212,001
$P_{ем} = \frac{\alpha \cdot P_{мх}}{\alpha - \beta}$	4.4	кВт	405,45	609,27	813,82	1019,12	1225,53
$z_{2\beta}' = \sqrt{\left(\frac{r_2'}{\beta}\right)^2 + (x_{2н}')^2}$	3.1.6	Ом	7,69	5,13	3,85	3,08	2,53
$E_1 = z_{2\beta}' \cdot \sqrt{\frac{10^3 \cdot P_{ем} \cdot \alpha \cdot \beta}{m_1 \cdot r_2'}}$	3.1.16	В	1019,50	1020,76	1022,17	1023,72	1017,97
$\Phi = \frac{E_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot k_{об} \cdot w_1 \cdot \alpha \cdot f_{1н}}$	3.1.17	Вб	0,092	0,093	0,093	0,093	0,092

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

1	2	3	4	5	6	7	8
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,043	1,047	1,051	1,056	1,061
$\gamma = \arccos\left(\frac{C_{EA}}{C_{EP}}\right)$			2,51	2,50	3,54	4,32	4,97
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	B	1063,02	1068,59	1074,30	1080,74	1080

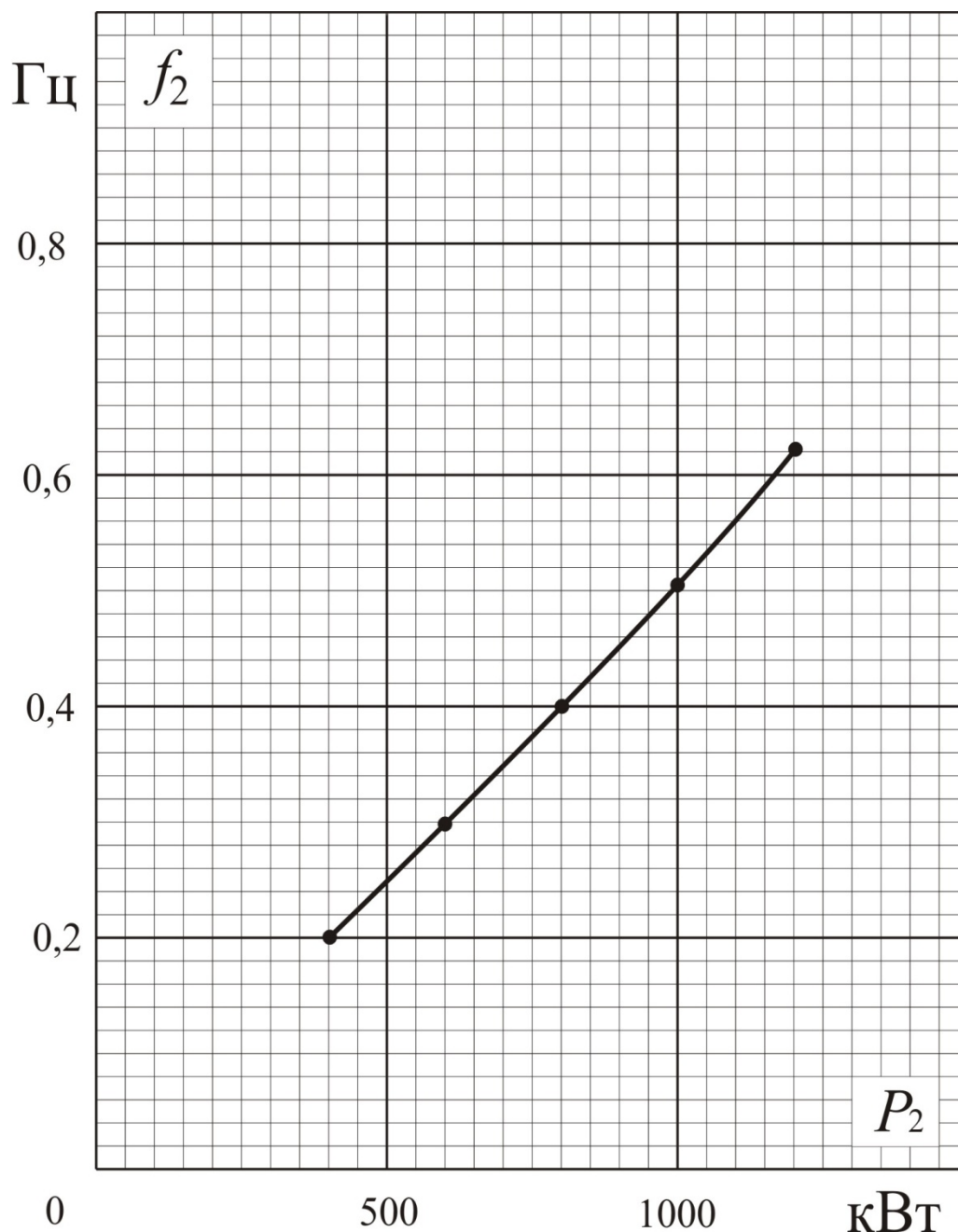


Рисунок 4.2.3 – Залежність росту частоти ротора f_2 від корисної потужності P_2

По результатам таблиці 4.2.6 проведемо розрахунок робочих характеристик.

Приклад розрахунку покажемо для випадку $P_2=1000$ кВт та $f_2=0,53$ Гц.

Згідно формул (3.1.1) та (3.1.2) маємо значення величини ковзання [2]

$$s = \frac{\beta}{\alpha}, \quad (4.2.5)$$

$$s = \frac{0,0089}{1} = 0,0089.$$

З еквівалентної схеми заміщення (рисунок 3.1.2 а) коефіцієнт потужності , струм статора і його активна складова

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_{ex}}{z_{ex}}, \quad (4.2.6)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{2,406}{2,849} = 0,845,$$

$$I_1 = \frac{U_1}{z_{ex}}, \quad (4.2.7)$$

$$I_1 = \frac{1080}{2,849} = 379,32 \text{ A.}$$

$$I_{1a} = I_1 \cdot \cos \varphi_1, \quad (4.2.8)$$

$$I_{1a} = 379,32 \cdot 0,845 = 320,34 \text{ A.}$$

Синус кута $\sin \varphi_1$ і сам кут φ_1 знайдемо як

$$\sin \varphi_1 = \frac{x_{ex}}{z_{ex}}, \quad (4.2.9)$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{1,56}{2,849} = 0,536$$

						Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\varphi_1 = \arcsin \varphi_1 \quad (4.2.10)$$

$$\varphi_1 = \arcsin 0,536 = 32,41$$

Активну складову потужності P_1 знайдемо за формулою [9]

$$P_{1a} = m_1 \cdot U_1 \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}, \quad (4.2.11)$$

$$P_{1a} = 3 \cdot 1080,74 \cdot 320,34 \cdot 10^{-3} = 1038,62 \text{ кВт.}$$

Коефіцієнт корисної дії представляє собою відношення [9]

$$\eta = \frac{P_2}{P_{1a}}, \quad (4.2.12)$$

$$\eta = \frac{1000}{1038,62} = 0,963$$

Електричні втрати у статорі знайдемо за формулою [4]

$$P_{e1} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_1^2 \cdot 10^3, \quad (4.2.13)$$

$$P_{e1} = 3 \cdot 0,0344 \cdot 379,32 \cdot 10^{-3} = 14,849 \text{ кВт.}$$

Струм холостого ходу знайдемо як [2]

$$I_o = \frac{E_1}{Z_{MH}}, \quad (4.2.14)$$

						Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_o = \frac{1023,72}{6,301} = 162,47 \text{ A.}$$

Втрати у сталі [2]

$$P_c = m_1 \cdot r_m \cdot I_o^2 \cdot 10^{-3}, \quad (4.2.15)$$

$$P_c = 3 \cdot 0,187 \cdot 162,47^2 \cdot 10^{-3} = 9,502 \text{ кВт.}$$

Отже, електромагнітна потужність

$$P_{em} = P_{1a} - P_{e1} - P_c, \quad (4.2.16)$$

$$P_{em} = 1038,62 - 14,849 - 9,502 = 1014,27 \text{ кВт.}$$

Обертний момент на валу двигуна знайдемо за формулою [2]

$$M = \frac{p \cdot P_2}{2 \cdot \pi \cdot (f_1 - f_2)}, \quad (4.2.17)$$

$$M = \frac{3 \cdot 1000 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot (55,9 - 0,5)} = 8,618 \text{ кНм.}$$

Споживну потужність P_1 знайдемо як [4]

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1, \quad (4.2.18)$$

						Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_1 = 3 \cdot 1080,74 \cdot 379,32 = 1229,85 \text{ кВт.}$$

Розрахунок для значень $P_2=400 \text{ кВт}$, $f_2=0,2 \text{ Гц}$; $P_2=600 \text{ кВт}$, $f_2=0,3 \text{ Гц}$; $P_2=800 \text{ кВт}$, $f_2=0,4 \text{ Гц}$; $P_2=1000 \text{ кВт}$, $f_2=0,5 \text{ Гц}$; $P_2=1200 \text{ кВт}$, $f_2=0,609 \text{ Гц}$ приведемо у таблиці 4.2.7.

По результатам розрахунків, приведених у таблиці 4.2.7, будемо робочі характеристики асинхронного двигуна (рисунок 4.2.4).

						Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2.7 – Розрахунок робочих характеристик

Розрахункова величина та формула	Номер формули	Одиниці вимірювання	P_2 кВт				
			400	600	800	1000	1200
1	2	3	4	5	6	7	8
f_2	Рис. 4.2.2	Гц	0,2	0,3	0,4	0,5	0,609
$s = \frac{\beta}{\alpha}$	4.2.5	-	0,0036	0,0054	0,0072	0,0089	0,0109
$z_{ex} = \sqrt{R_{ex}^2 + x_{ex}^2}$	3.1.13	Ом	5,041	4,072	3,369	2,849	2,435
$\cos \varphi_1 = \frac{R_{ex}}{z_{ex}}$	4.2.6	-	0,621	0,741	0,808	0,845	0,869
$\sin \varphi_1 = \frac{x_{ex}}{z_{ex}}$	4.2.9	-	0,784	0,671	0,589	0,536	0,495
$\varphi_1 = \arcsin \varphi_1$	4.2.10		51,63	42,14	36,09	32,41	29,47
$I_1 = \frac{U_1}{z_{ex}}$	4.2.7	А	210,87	262,45	318,91	379,32	440,25
$I_{1a} = I_1 \cdot \cos \varphi_1$	4.2.8	А	130,94	194,54	257,62	320,34	386,20
$P_{1a} = m_1 \cdot U_1 \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	4.2.11	кВт	417,57	623,64	830,29	1038,62	1249,00
$\eta = \frac{P_2}{P_{1a}}$	4.2.12	-	0,958	0,962	0,964	0,963	0,961
$P_{el} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_1^2 \cdot 10^{-3}$	4.2.13	кВт	4,588	7,108	11,495	14,849	20,29
$I_0 = \frac{E_1}{z_{MH}}$	4.2.14	А	159,99	161,99	162,22	162,47	159,03

Зм.		
Арк.		
№ докум.		
Підпис		
Дата		
80	.	

Продовження таблиці 4.2.7

$P_c = m_1 \cdot r_{.м} \cdot I_0^2 \cdot 10^{-3}$	4.2.15	кВт	8,523	9,447	9,473	9,502	9,104
$P_{ем} = P_{1a} - P_{el} - P_c$	4.2.16	кВт	404,46	607,08	810,32	1014,27	1219,22
$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1$	4.2.18	А	672,46	841,34	1027,80	1229,85	1436,61
$M = \frac{p \cdot P_2}{2 \cdot \pi \cdot (f_1 - f_2)}$	4.2.17	кНм	3,428	5,152	6,882	8,618	10,362

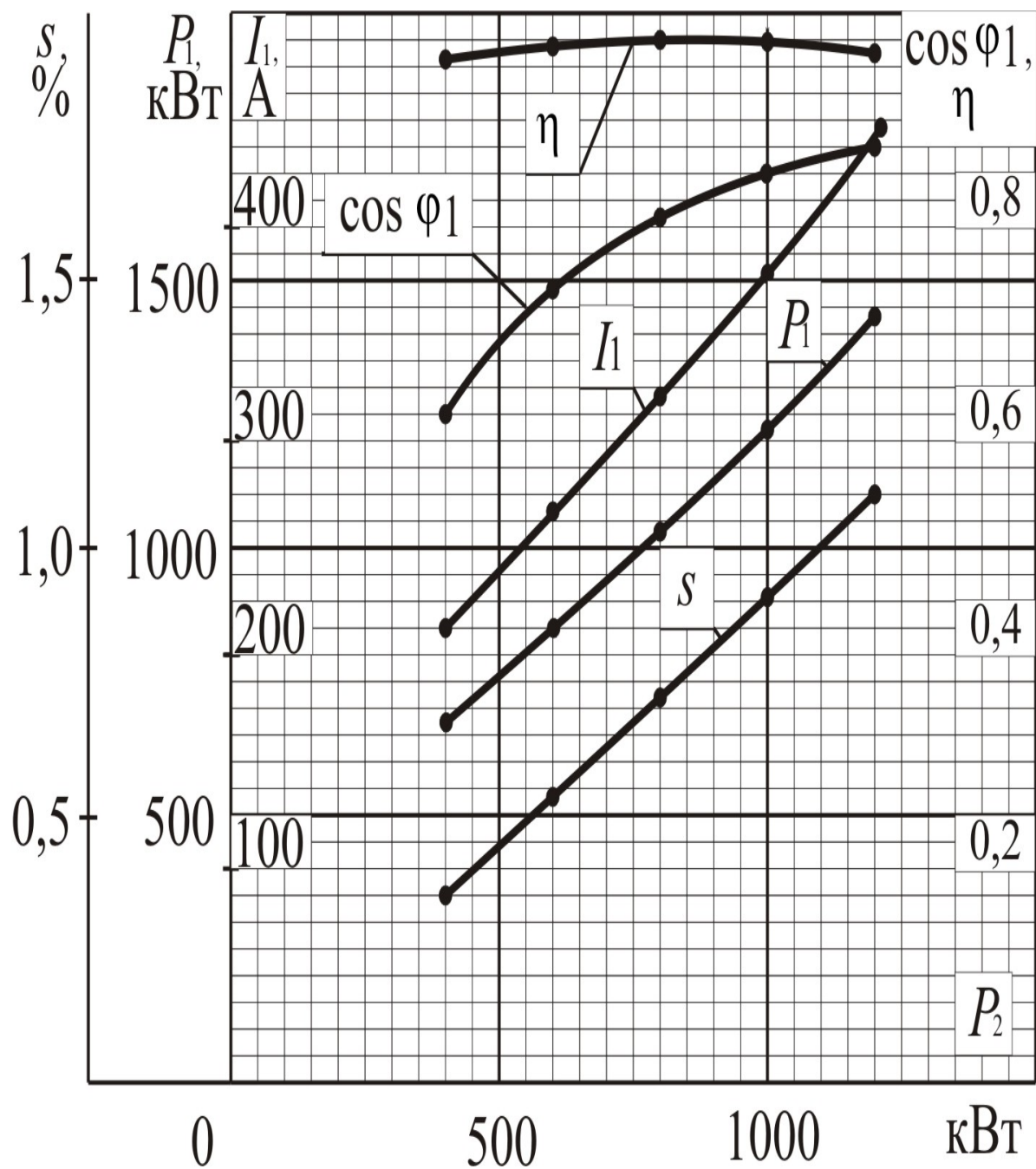


Рисунок 4.2.4 – Робочі характеристики тягового двигуна АД – 914 У

4.3 Розрахунок електротягових характеристик

Необхідні тягові властивості електрорухомого складу визначаються не типом приводу, а умовами експлуатації даного тягового засобу. Таким чином потужність номінального режиму вантажних електровозів вибирають з умови керування поїздів заданої маси за умови реалізації встановленої ходової швидкості руху поїздів.

Незалежно від призначення електрорухомого складу необхідно забезпечити можливість реалізації граничної сили тяги, показаної лінією $F_K(v)$ на рисунку 4.3.1 а, тобто повинна бути забезпечена можливість підтримання:

на ділянці розгону ($0 < v < v_{\Pi}$) – граничної за діючими обмеженням сили тяги;

в області запускових швидкостей руху ($v > v_{\Pi}$) – постійної реалізованої потужності ($F_K(v) = const$).

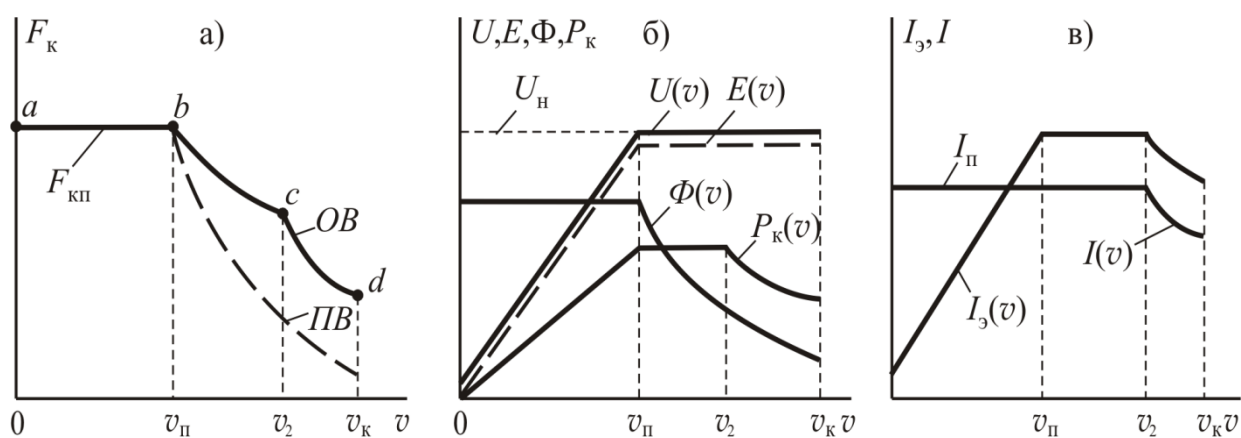


Рисунок 4.3.1 – Зміна параметрів режиму тягового двигуна постійного струму при реалізації граничної тягової характеристики

Відзначимо, що остання умова для пасажирських електровозів зазвичай поширюється на весь діапазон швидкості руху $v_{\Pi} < v < v_K$. У вантажних

електровозах при $v = v_k$ може бути допущено зниження потужності до 60% від номінальної при відповідному зниженні сили тяги.

У випадку асинхронного тягового приводу реалізація всіх допустимих за діючими обмеженням значень сили тяги можлива тільки у разі амплітудно-частотного регулювання, що дозволяє змінювати як величину сили тяги, так і величину синхронної швидкості.

Швидкість v_{Π} відповідає номінальному режиму роботи асинхронного керованого частотою тягового двигуна і саме при цій швидкості прийнято визначати всі параметри номінального режиму (напругу, частоту струму статора, к. п. д., коефіцієнт потужності та ін.).

В області $v > v_{\Pi}$ звичайно передбачають можливість реалізації номінальної потужності електровоза. Цей режим, званий режимом постійної потужності, можна реалізувати двома способами:

при постійній напрузі U_1 і регульованому абсолютному ковзанні f_2 ;

при постійному абсолютному ковзанні f_2 і регульованій напрузі джерела живлення [2].

4.3.1 Порядок розрахунку характеристик першої зони регулювання

Зміну параметрів регулювання режима асинхронного двигуна при реалізації будь-якої тягової характеристики умовно можна розподілити на три зони. Параметри першої зони $0 < v \leq v_{\Pi}$ можна визначити за допомогою результатів розрахунку робочих характеристик.

Таким чином в зоні пуску, тобто підтримання постійної сили тяги $F_k = const$ ми виконуємо регулювання при мінімальному значенні пускових струмів.

						Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок методики в зоні регулювання $0 < v \leq v_{\Pi}$ аналогічний методиці визначення робочих характеристик, за деякими виключеннями, тому розрахунок характеристик вважаємо приводити нераціональним.

Для можливості підтримання постійної величини сили тяги $F_K = const$ задаємося на діапазоні швидкостей $0 < v \leq v_{\Pi}$ постійним тяговим моментом $M = const$, та постійним значенням частоти струму ротора $f_2 = const$. Корисну потужність визначаємо через тяговий обертовий момент на валу двигуна скориставшись формулою [2]

$$M = \frac{P_2 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot (f_1 - f_2)}, \quad (4.3.1)$$

Звідки

$$P_2 = \frac{M \cdot 2 \cdot \pi \cdot (f_1 - f_2)}{p}. \quad (4.3.2)$$

Після визначення корисної потужності визначаємо всі інші необхідні параметри розрахунку.

4.3.2 Порядок розрахунку характеристик другої зони регулювання

Параметри другої зони регулювання в діапазоні швидкостей $v_{\Pi} \leq v \leq v_2$ визначаються на основі кінцевих даних розрахунку першої зони регулювання.

Зростання швидкості руху (і частоти f_1) при незмінній напрузі $U_1 = U_{1H}$ супроводжується зниженням магнітного потоку обернено пропорційно швидкості руху та розраховується за допомогою формули [2]

$$\Phi = \Phi_H \frac{f_{1H}}{f_1} \quad \text{або} \quad \Phi \cong \Phi_H \frac{v_{\Pi}}{v} \quad (4.3.3)$$

У режимі постійної потужності (на рисунку 4.3.1 інтервал $v_{\Pi} \leq v \leq v_2$) сила тяги F_K знижується обернено пропорційно швидкості руху та розраховується за допомогою формули [2]

$$F_K = F_{\text{кп}} \frac{f_{1\text{н}}}{f_1} \quad \text{або} \quad F_K \cong F_{\text{кп}} \frac{v_{\Pi}}{v} \quad (4.3.4)$$

4.3.3 Порядок розрахунку характеристик третьої зони регулювання

При розрахунку 3 зони характеристик в діапазоні швидкостей $v_2 < v \leq v_K$ необхідно враховувати розраховані параметри для другої зони та визначитися з умовою варіанту виду руху при якому буде працювати тяговий електрорухомий склад, якщо необхідно підтримувати постійну потужність (пасажирський рух), то розрахунок 3 зони аналогічний 2, тобто їх можна об'єднати (частота струму ротора f_2 буде збільшуватися до v_K), в іншому випадку (вантажний рух) частоту f_2 потрібно підтримувати постійною.

Розрахунок почнемо з визначення дійсного значення частоти f_2 скориставшись тією ж схемою, що і для визначення робочих характеристик двигуна. Тому наводити приклад розрахунку не є недоцільним. Розрахунок проведемо для діапазону частот струму статора в межах $0 \dots 140$ Гц при заданих початкових умовах: $M = 10400 \text{ нМ}$, $U_{1\text{н}} = 1080 \text{ В}$, $P_{2\text{н}} = 1200 \text{ кВт}$. Дані розрахунку занесемо до таблиці 4.3.1 та 4.3.2.

По даним таблиці 4.3.1 та 4.3.2 будемо графік залежності $f_2 (U_1)$ рисунок 4.3.2 із якого і знаходимо дійсно реалізуючі значення частоти f_2 . Саме для цих значень частоти і проведемо розрахунок електротягових характеристик, який покажемо у таблиці 4.3.3.

						Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.3.1 – Знаходження дійсно реалізуючого значення частоти f_2 при швидкості 80, 100 та 120 км/год

v	км/год	80				100				120			
f_2	Гц	0,5	0,75	1,0	1,5	0,5	0,75	1,0	1,5	0,5	0,75	1,0	1,5
f_1	Гц	70,22	70,47	70,72	71,22	87,65	87,9	88,15	88,65	105,08	105,33	105,58	106,08
$p_{мех}$	кВт	1,437	1,440	1,443	1,449	1,850	1,858	1,866	1,875	2,300	2,306	2,313	2,325
E_1	В	1256,5	1026,9	899,4	745,8	1403,0	1151,3	1002,9	830,4	1535,8	1259,6	1096,7	907,3
Φ	Вб	0,091	0,075	0,064	0,053	0,081	0,066	0,058	0,047	0,074	0,061	0,053	0,043
x_{MH}	Ом	6,5	7,73	8,3	8,9	7,25	8,23	8,65	9,03	7,73	8,48	8,9	9,3
r_{MH}	Ом	0,124	0,161	0,180	0,194	0,125	0,178	0,188	0,200	0,162	0,184	0,494	0,204
U_I	В	1318,18	1081,0	954,1	808,6	1461,4	1201,4	1051,6	882,2	1593,1	1308,1	1141,9	951,8

Таблиця 4.3.2 – Знаходження дійсно реалізуючого значення частоти f_2 при швидкості 140 та 160 км/год

ν	км/год	140				160			
f_2	Гц	0,5	0,75	1,0	1,5	0,5	0,75	1,0	2,0
f_1	Гц	122,51	122,76	123,01	123,51	139,94	140,19	140,44	141,44
$p_{мех}$	кВт	2,675	2,688	2,700	2,725	3,125	3,144	3,163	3,200
E_1	В	1657,9	1359,4	1183,2	858,7	1771,9	1452,4	1263,8	918,1
Φ	Вб	0,069	0,056	0,049	0,035	0,064	0,053	0,046	0,033
$x_{мн}$	Ом	8,05	8,75	9,0	9,25	8,27	8,9	9,1	9,45
$r_{мн}$	Ом	0,182	0,190	0,198	0,207	0,180	0,194	0,200	0,202
U_l	В	1715,4	1406,8	1226,6	1018,4	1830,0	1499,7	1306,2	951,8

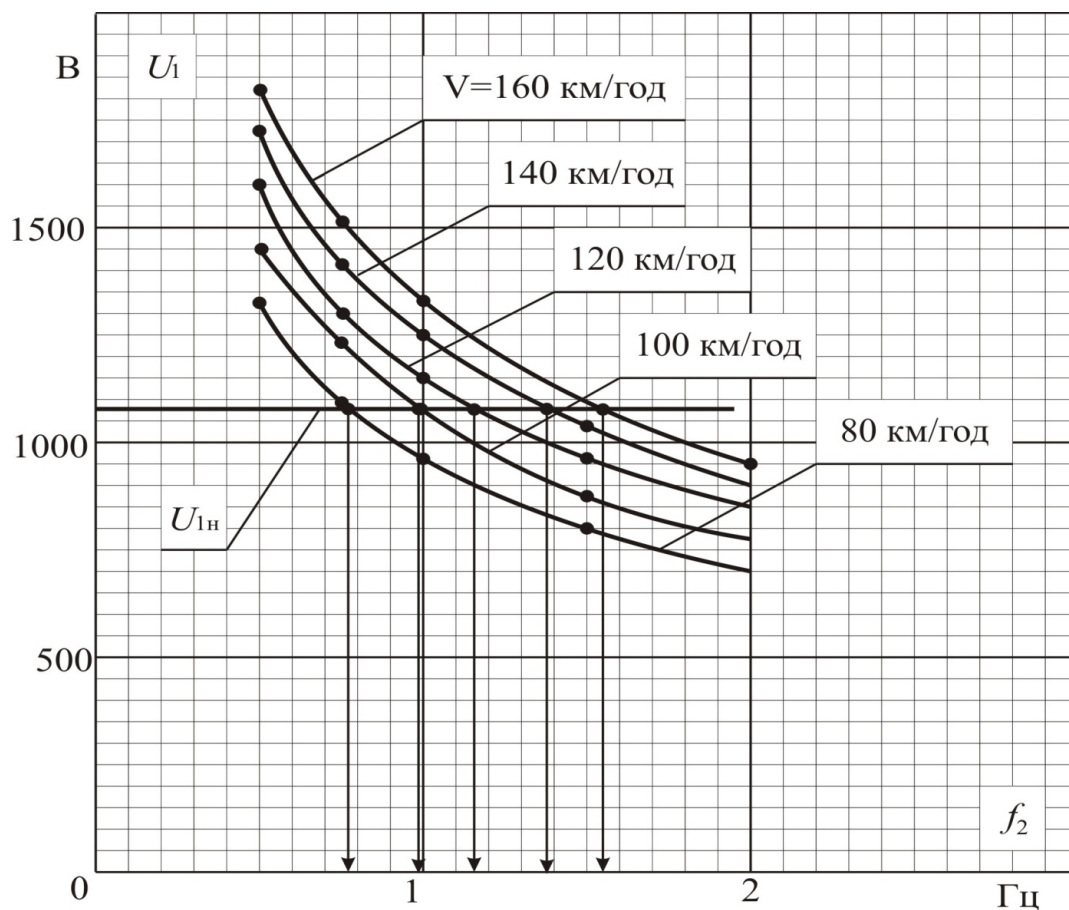


Рисунок 4.3.2 – Залежність напруги статора від частоти ротора при різних значеннях реалізуючої швидкості руху при врахуванні степені насичення магнітної системи

Таблиця 4.3.3 – Результати розрахунків електротягових характеристик

Розрахункова формула	Одиниці вимірювання	Отримані розрахункові дані							
		636,94	869,23	1080	1080	1080	1080	1080	1080
U_1	В	636,94	869,23	1080	1080	1080	1080	1080	1080
v	км/год	20	40	63,43	80	100	120	140	160
f_2	Гц	0,609	0,609	0,609	0,77	0,98	1,16	1,38	1,55
f_1	Гц	18,04	35,47	35,47	70,49	88,13	105,74	123,39	140,99
Φ	Вб	0,092	0,092	0,092	0,073	0,058	0,049	0,041	0,036
F_k	Н	18918	18918	18918	14999	11999	9999	8571	7499
E_1	В	585,25	813,58	1017,97	1017,97	1017,97	1017,97	1017,97	1017,97
P_2	кВт	378,36	756,72	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Розраховані характеристики покажемо на рисунку 4.3.3

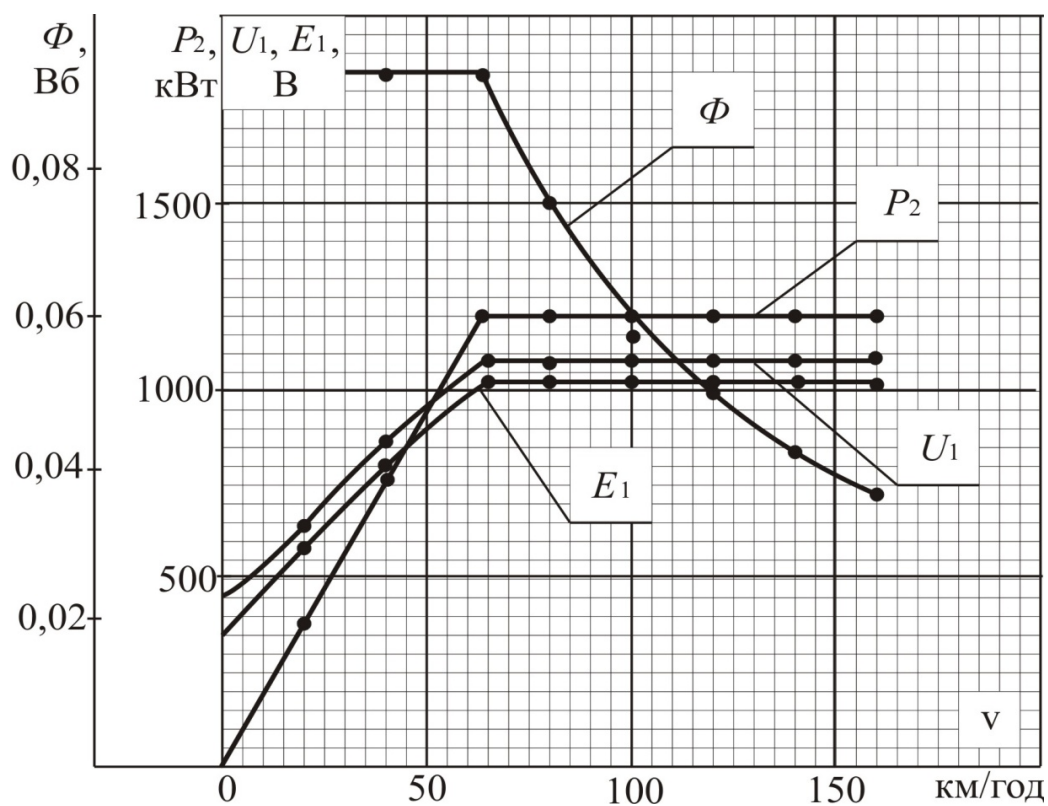
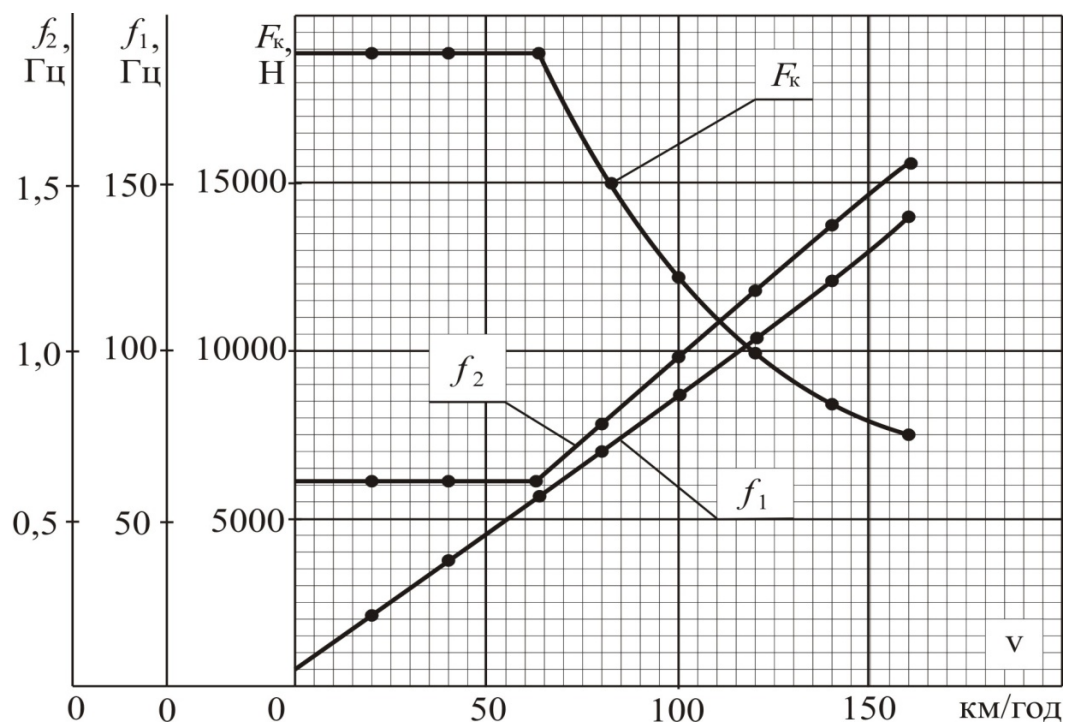


Рисунок 4.3.3 – Криві зміни параметрів режиму тягового двигуна АД-914У в залежності від швидкості з урахуванням степені насичення магнітної системи

5 Аналіз похибок розрахунків при нехтуванні змінної насичення магнітної системи

Як уже зазначалося раніше у пункті 4 даної роботи, загальноприйняті методи розрахунку характеристик частотно-регульованих двигунів не враховують зміну ступеня насичення магнітної системи, так як вони незначні. Але, щоб довести доцільність даної роботи, проведемо розрахунок робочих та електротягової характеристик по загальноновживаному методу, прийнявши значення параметрів еквівалентної схеми заміщення x_{mn} і r_{mn} незмінними і такими, що відповідають номінальному режиму роботи, тобто $x_{mn}=6,75$ Ом, $r_{mn}=0,135$ Ом.

5.1 Розрахунок робочих характеристик без урахування ступеня насичення магнітної системи

Розрахунок робочих характеристик будемо проводити аналогічно розрахунку в пункті 4. Розрахунок покажемо для одного з випадків, наприклад для $U_n=600$ В, $P_2=400$ кВт, $f_2=0,15$ Гц. Значення величини відносної частоти струму статора α і ротора β , частоти обертання ротора n , електромагнітної P_{em} та механічної P_{mx} потужностей, модулів комплексного опору обмотки ротора $z'_{2\beta}$ і статора $z_{1\alpha}$, величини е.р.с. E_1 та магнітного потоку Φ визначати не будемо, оскільки їх значення від опорів x_{mn} і r_{mn} не залежать, отже вони залишаються такими як і у пункті 4.

Модуль комплексного опору фази намагнічуючого кола знайдемо за формулою (3.1.7)

$$z_{mn} = \sqrt{6,75^2 + 0,135^2} = 6,751 \text{ Ом.}$$

Квадрат модуля комплексного опору $z_{2\beta}^2$ рівний

						Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$z_{2,м\beta}^2 = \left(\frac{0,0275}{0,0027} + 0,135 \right)^2 + (0,161 + 6,75)^2 = 151,679 \text{ Ом.}$$

За (3.1.9) знайдемо значення квадрату модуля опору $z_{2e\beta}^2$, але спочатку за (3.1.10) і (3.1.11) знайдемо значення активної та індуктивної його складової відповідно

$$R_{2e\beta} = \frac{(10,25)^2 \cdot 0,135 + 6,751^2 \cdot \frac{0,0275}{0,0027}}{155,679} = 3,095 \text{ Ом.}$$

$$x_{2e\beta} = \frac{10,25^2 \cdot 6,75 + 6,751^2 \cdot 0,180}{155,679} = 4,608 \text{ Ом.}$$

Отже

$$z_{2e\beta}^2 = 3,095^2 + 4,608^2 = 30,813 \text{ Ом.}$$

Активна $r_{вх}$ та індуктивна $x_{вх}$ складова вхідного опору згідно (3.1.14) та (3.1.15) рівні

$$R_{ex} = \frac{0,0344}{1} + 3,095 = 3,130 \text{ Ом.}$$

$$x_{ex} = 0,238 + 4,608 = 4,846 \text{ Ом.}$$

Щоб знайти значення фазної напруги U_1 згідно (3.1.18) знайдемо спочатку значення коефіцієнту C_E (3.1.19) та значення дійсної C_{EA} (3.1.20) та уявної C_{EP} (3.1.21) його складові

						Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_{EA} = \frac{3,095 \cdot 3,130 + 4,608 \cdot 4,846}{30,813} = 1,039$$

$$C_{EP} = \frac{3,095 \cdot 4,846 - 4,608 \cdot 3,130}{30,813} = 0,019$$

$$C_E = \sqrt{1,039^2 + 0,019^2} = 1,039.$$

Отже, величина фазної напруги, що не залежить від степені насичення магнітної системи

$$U_1 = 1,039 \cdot 1176,54 = 1222,68 \text{ В.}$$

Знайдемо величину похибки, що допускається при розрахунках

$$\Delta = \left| \frac{Y_{(бун)} \cdot 100}{Y_{(зун)}} - 100 \right| \quad (5.1.1)$$

де $Y_{(бун)}$ – величина похибки, яка знаходиться без урахування насичення;

$Y_{(зун)}$ – величина похибки, якої знаходиться з урахування насичення.

$$\Delta = \left| \frac{1222,68 \cdot 100}{1237,17} - 100 \right| = 1,17 \%$$

Як бачимо з розрахунків величина похибки при визначенні фазної напруги U_1 , при нехтуванні степені насичення магнітної системи, є незначною і у практиці на режимі роботи не відображається.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

Аналогічні розрахунки приведемо у таблицях 5.1.1 – 5.1.5 для значень $P_2=400 - 1200$ кВт та різних значень частоти f_2 .

По даним таблиць 5.1.1 – 5.1.5 будемо графік залежності $f_2(U_1)$ (рисунок 5.1.1) із якого знаходимо дійсне значення частоти f_2 при якому реалізується задана корисна потужність P_2 . Як бачимо, ці частоти такі ж як і при врахуванні степені насичення магнітної системи.

						Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.1.1 – Розрахунок $U_1(f_2)$ за заданим значенням $P_2 = 400$ кВт

Розрахункова величина та формула	№ формули	Одиниці вимірю- вання	f_2 , Гц									
			0,15	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$r_{\text{мн}}$ - по $r_{\text{мн}}(\Phi)$	-	Ом	0,135									
$x_{\text{мн}}$ - по $x_{\text{мн}}(\Phi)$	-	Ом	6,75									
$z_{\text{мн}} = \sqrt{r_{\text{мн}}^2 + x_{\text{мн}}^2}$	3.1.7	Ом	6,751									
$z_{2\beta}^2 = \left(\frac{r_2'}{\beta} + r_{\text{мн}}\right)^2 + (x_2' + x_{\text{мн}})^2$	3.1.12	Ом	155,679	58,095	52,557	50,575	49,638	49,119	48,799	48,588	48,440	48,332
$R_{2e\beta} = \frac{\left(z_{2\beta}'^2 \cdot r_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta}\right)}{z_{2\beta}^2}$	3.1.10	Ом	3,095	2,435	1,789	1,392	1,134	0,954	0,823	0,723	0,644	0,581
$x_{2e\beta} = \frac{z_{2\beta}'^2 \cdot x_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot x_{2\text{н}}}{z_{2\beta}^2}$	3.1.11	Ом	4,608	1,243	0,700	0,482	0,375	0,316	0,279	0,255	0,239	0,227
$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2$	3.1.9	Ом ²	30,813	7,476	3,690	2,170	1,426	1,010	0,775	0,588	0,472	0,389
$R_{\text{ex}} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta}$	3.1.14	Ом	3,130	2,470	1,823	1,427	1,168	0,989	0,857	0,757	0,679	0,616
$x_{\text{ex}} = x_{1\text{н}} + x_{2e\beta}$	3.1.15	Ом	4,846	1,481	0,938	0,720	0,613	0,554	0,517	0,493	0,477	0,465
$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{\text{ex}} + x_{2e\beta} \cdot x_{\text{ex}}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.20	-	1,039	1,051	1,062	1,075	1,090	1,107	1,126	1,146	1,167	1,190

Продовження таблиці 5.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{ex} - x_{2e\beta} \cdot R_{ex}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.21	-	0,019	0,072	0,109	0,145	0,180	0,214	0,247	0,278	0,307	0,335
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,039	1,053	1,067	1,085	1,105	1,127	1,152	1,179	1,207	1,237
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	В	1222,68	681,93	566,75	501,39	459,55	431,07	411,51	396,71	386,50	379,33
Δ	5.1.1	%	1,17	0,71	0,81	0,86	0,85	0,83	0,93	0,79	0,76	0,73

Таблиця 5.1.2 – Розрахунок $U_1(f_2)$ за заданим значенням $P_2 = 600$ кВт

Розрахункова величина та формула	№ формули	Одиниці вимірю- вання	$f2$, Гц									
			0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
r_{mn} - по $r_{mn}(\Phi)$	-	Ом	0,135									
x_{mn} - по $x_{mn}(\Phi)$	-	Ом	6,75									
$z_{mn} = \sqrt{r_{mn}^2 + x_{mn}^2}$	3.1.7	Ом	6,751									
$z_{2m\beta}^2 = \left(\frac{r_2'}{\beta} + r_{mn} \right)^2 + (x_2' + x_{mn})^2$	3.1.12	Ом	87,313	58,095	52,557	50,575	49,638	49,119	48,800	48,588	48,440	48,332
$R_{2e\beta} = \frac{\left(z_{2\beta}^{\prime 2} \cdot r_{mn} + z_{mn}^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta} \right)}{z_{2m\beta}^2}$	3.1.10	Ом	3,271	2,435	1,789	1,392	1,134	0,954	0,823	0,723	0,644	0,581
$x_{2e\beta} = \frac{z_{2\beta}^{\prime 2} \cdot x_{mn} + z_{mn}^2 \cdot x_2'}{z_{2m\beta}^2}$	3.1.11	Ом	3,019	1,243	0,700	0,482	0,375	0,316	0,279	0,255	0,239	0,227

Продовження таблиці 5.1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2$	3.1.9	OM ²	19,815	7,476	3,690	2,170	1,426	1,010	0,755	0,588	0,472	0,389
$R_{\text{ex}} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta}$	3.1.14	OM	3,305	2,470	1,823	1,427	1,168	0,989	0,857	0,757	0,679	0,616
$x_{\text{ex}} = x_{1H} + x_{2e\beta}$	3.1.15	OM	3,257	1,481	0,938	0,720	0,613	0,554	0,517	0,493	0,477	0,465
$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{\text{ex}} + x_{2e\beta} \cdot x_{\text{ex}}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.20	-	1,042	1,051	1,062	1,075	1,090	1,107	1,126	1,146	1,167	1,190
$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{\text{ex}} - x_{2e\beta} \cdot R_{\text{ex}}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.21	-	0,034	0,072	0,109	0,145	0,180	0,214	0,247	0,278	0,307	0,335
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,043	1,053	1,067	1,085	1,105	1,127	1,152	1,179	1,207	1,237
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	B	1164,97	835,19	694,13	614,07	562,84	527,95	503,40	485,87	473,38	464,59
Δ	5.1.1	%	1,18	0,41	0,69	0,76	0,79	0,78	0,77	0,77	0,76	0,73

Таблиця 5.1.3 – Розрахунок $U_1(f_2)$ за заданим значенням $P_2 = 800$ кВт

[illegible]

Змін.	
Арк.	
№ докум.	
Підпис	
Дата	
97	

Продовження таблиці 5.1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$z_{2\text{м}\beta}^2 = \left(\frac{r_2'}{\beta} + r_{\text{мн}} \right)^2 + (x_2' + x_{\text{мн}})^2$	3.1.12	Ом	75,473	58,095	52,557	50,575	49,638	49,119	48,799	48,588	48,440	48,332
$R_{2e\beta} = \frac{\left(z_{2\beta}^{\prime 2} \cdot r_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta} \right)}{z_{2\text{м}\beta}^2}$	3.1.10	Ом	3,144	2,435	1,789	1,392	1,134	0,954	0,823	0,723	0,644	0,581
$x_{2e\beta} = \frac{z_{2\beta}^{\prime 2} \cdot x_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot x_{2\text{н}}'}{z_{2\text{м}\beta}^2}$	3.1.11	Ом	2,460	1,243	0,700	0,482	0,0375	0,316	0,279	0,255	0,239	0,227
$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2$	3.1.9	Ом ²	15,933	7,476	3,690	2,170	1,426	1,010	0,755	0,588	0,472	0,389
$R_{\text{вх}} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta}$	3.1.14	Ом	3,178	2,470	1,823	1,427	1,168	0,989	0,857	0,757	0,679	0,616
$x_{\text{вх}} = x_{1\text{н}} + x_{2e\beta}$	3.1.15	Ом	2,698	1,481	0,938	0,720	0,613	0,554	0,517	0,493	0,477	0,465
$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{\text{вх}} + x_{2e\beta} \cdot x_{\text{вх}}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.20	-	1,044	1,051	1,062	1,075	1,090	1,107	1,126	1,146	1,167	1,190
$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{\text{вх}} - x_{2e\beta} \cdot R_{\text{вх}}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.21	-	0,042	0,072	0,109	0,145	0,180	0,214	0,247	0,278	0,307	0,335
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,044	1,053	1,067	1,085	1,105	1,127	1,152	1,179	1,207	1,237
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	В	1230,96	964,39	801,51	709,07	649,91	609,62	581,27	561,04	546,60	536,46
Δ	5.1.1	%	1,16	0,16	0,54	0,68	0,68	0,74	0,73	0,75	0,73	0,72

Таблиця 5.1.4 – Розрахунок $U_1(f_2)$ за заданим значенням $P_2 = 1000$ кВт

Розрахункова величина та формула	№ формули	Одиниці вимірю- вання	f_2 , Гц									
			0,3	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
r_{mn} - по $r_{mn}(\Phi)$	-	Ом	0,135									
x_{mn} - по $x_{mn}(\Phi)$	-	Ом	6,75									
$z_{mn} = \sqrt{r_{mn}^2 + x_{mn}^2}$	3.1.7	Ом	6,751									
$z_{2\beta}^2 = \left(\frac{r_2'}{\beta} + r_{mn} \right)^2 + (x_2' + x_{mn})^2$	3.1.12	Ом	60,408	58,095	52,557	50,575	49,638	49,119	48,799	48,588	48,440	48,332
$R_{2e\beta} = \frac{\left(z_{2\beta}^{\prime 2} \cdot r_{mn} + z_{mn}^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta} \right)}{z_{2\beta}^2}$	3.1.10	Ом	2,605	2,435	1,789	1,392	1,134	0,954	0,823	0,723	0,644	0,581
$x_{2e\beta} = \frac{z_{2\beta}^{\prime 2} \cdot x_{mn} + z_{mn}^2 \cdot x_{2n}'}{z_{2\beta}^2}$	3.1.11	Ом	1,443	1,243	0,700	0,482	0,375	0,316	0,279	0,255	0,239	0,227
$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2$	3.1.9	Ом ²	8,869	7,476	3,690	2,170	1,426	1,010	0,755	0,588	0,472	0,389
$R_{ex} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta}$	3.1.14	Ом	2,639	2,470	1,823	1,427	1,168	0,989	0,857	0,757	0,679	0,616
$x_{ex} = x_{1n} + x_{2e\beta}$	3.1.15	Ом	1,681	1,481	0,938	0,720	0,613	0,554	0,517	0,493	0,477	0,465
$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{ex} + x_{2e\beta} \cdot x_{ex}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.20	-	1,049	1,051	1,062	1,075	1,090	1,107	1,126	1,146	1,167	1,190

Продовження таблиці 5.1.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{6x} - x_{2e\beta} \cdot R_{6x}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.21	-	0,064	0,072	0,109	0,145	0,180	0,214	0,247	0,278	0,307	0,335
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,051	1,053	1,067	1,085	1,105	1,127	1,152	1,179	1,207	1,237
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	В	1133,05	1078,22	896,11	792,76	726,62	681,58	649,88	627,26	611,11	599,78
Δ	5.1.1	%	0,53	0,23	0,38	0,56	0,63	0,67	0,70	0,68	0,68	0,67

Таблиця 5.1.5 – Розрахунок $U_1(f_2)$ за заданим значенням $P_2 = 1200$ кВт

Розрахункова величина та формула	№ формули	Одиниці вимірю- вання	f2, Гц									
			0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
$r_{\text{мн}}$ - по $r_{\text{мн}}(\Phi)$	-	Ом	0,135									
$x_{\text{мн}}$ - по $x_{\text{мн}}(\Phi)$	-	Ом	6,750									
$z_{\text{мн}} = \sqrt{r_{\text{мн}}^2 + x_{\text{мн}}^2}$	3.1.7	Ом	6,751									
$z_{2\text{м}\beta}^2 = (\frac{r_2'}{\beta} + r_{\text{мн}})^2 + (x_2' + x_{\text{мн}})^2$	3.1.12	Ом ²	58,095	52,557	50,575	49,638	49,119	48,799	48,588	48,440	48,332	
$R_{2e\beta} = \frac{(z_{2\beta}'^2 \cdot r_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta})}{z_{2\text{м}\beta}^2}$	3.1.10	Ом	2,435	1,789	1,392	1,134	0,954	0,823	0,723	0,644	0,581	
$x_{2e\beta} = \frac{z_{2\beta}'^2 \cdot x_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot x_{2\text{н}}'}{z_{2\text{м}\beta}^2}$	3.1.11	Ом	1,243	0,700	0,482	0,375	0,316	0,279	0,255	0,239	0,227	

Змін.		
Арк.		
№ докум.		
Підпис		
Дата		
100		

Продовження таблиці 5.1.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2$	3.1.9	Ом ²	7,476	3,690	2,170	1,426	1,010	0,755	0,588	0,472	0,389
$R_{ex} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta}$	3.1.14	Ом	2,470	1,823	1,427	1,168	0,989	0,857	0,757	0,679	0,616
$x_{ex} = x_{1н} + x_{2e\beta}$	3.1.15	Ом	1,481	0,938	0,720	0,613	0,554	0,517	0,493	0,477	0,465
$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{ex} + x_{2e\beta} \cdot x_{ex}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.20	-	1,051	1,062	1,075	1,090	1,107	1,126	1,146	1,167	1,190
$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{ex} - x_{2e\beta} \cdot R_{ex}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.21	-	0,072	0,109	0,145	0,180	0,214	0,247	0,278	0,307	0,335
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,053	1,067	1,085	1,105	1,127	1,152	1,179	1,207	1,237
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	В	1181,13	981,64	868,43	795,97	746,63	711,91	687,13	669,44	657,02
Δ	5.1.1	%	0,81	0,16	0,40	0,55	0,61	0,65	0,66	0,66	0,64

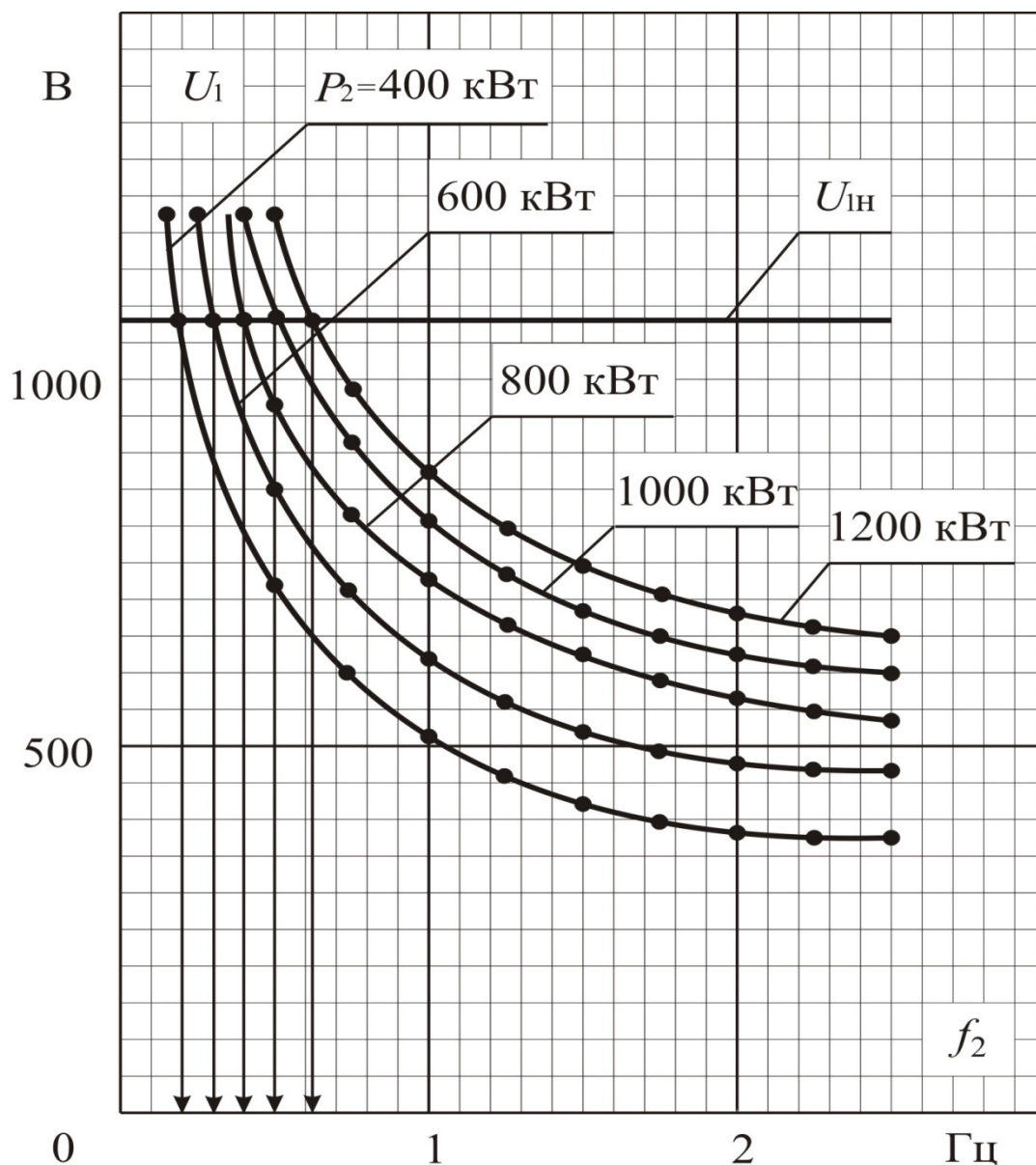


Рисунок 5.1.1 – Залежність напруги статора від частоти ротора при різних значеннях корисної потужності без урахування степені насичення магнітної системи

У таблиці 5.1.6 приведемо розрахунок , аналогічний вищенаведеному, для значень знайдених частот f_2 .

По результатам таблиці 5.1.6 здійснимо розрахунок робочих характеристик (рисунок 5.1.2), які не будуть враховувати степінь насичення магнітної системи.

Приклад розрахунку аналогічний тому, що приведений у пункті 4, тому результат занесемо до таблиці 5.1.7.

Таблиця 5.1.6 - Розрахунок робочих характеристик для знайдених значень f_2 із графіку залежності $f_2(U_1)$

Розрахункова величина та формула	Номер формули	Одиниці вимірювання	P_2 кВт				
			400	600	800	1000	1200
1	2	3	4	5	6	7	8
f_2	Рис. 5.1.1	Гц	0,2	0,3	0,4	0,5	0,609
$r_{\text{мн}}$ - по $r_{\text{мн}}(\Phi)$	-	Ом	0,135				
$x_{\text{мн}}$ - по $x_{\text{мн}}(\Phi)$	-	Ом	6,75				
$z_{\text{мн}} = \sqrt{r_{\text{мн}}^2 + x_{\text{мн}}^2}$	3.1.7	Ом	6,751				
$z_{2\text{м}\beta}^2 = (\frac{r_2'}{\beta} + r_{\text{мн}})^2 + (x_2' + x_{\text{мн}})^2$	3.1.12	Ом	109,012	75,473	63,327	58,095	54,86
$R_{2e\beta} = \frac{(z_{2\beta}'^2 \cdot r_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta})}{z_{2\text{м}\beta}^2}$	3.1.10	Ом	3,290	3,144	2,786	2,435	2,114
$x_{2e\beta} = \frac{z_{2\beta}'^2 \cdot x_{\text{мн}} + z_{\text{мн}}^2 \cdot x_{2\text{н}}'}{z_{2\text{м}\beta}^2}$	3.1.11	Ом	3,735	2,460	1,699	1,243	0,938
$z_{2e\beta}^2 = R_{2e\beta}^2 + x_{2e\beta}^2$	3.1.9	Ом ²	24,176	15,933	10,648	7,476	5,347
$R_{\text{ex}} = \frac{r_1}{\alpha} + R_{2e\beta}$	3.1.14	Ом	3,324	3,178	2,820	2,470	2,148
$x_{\text{ex}} = x_{1\text{н}} + x_{2e\beta}$	3.1.15	Ом	3,973	2,698	1,937	1,481	1,176
$C_{EA} = \frac{R_{2e\beta} \cdot R_{\text{ex}} + x_{2e\beta} \cdot x_{\text{ex}}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.20	-	1,040	1,044	1,047	1,051	1,055

Змн.		
Арк.		
№ докум.		
Підпис		
Дата		
103		

Продовження таблиці 5.1.6

$C_{EP} = \frac{R_{2e\beta} \cdot x_{ex} - x_{2e\beta} \cdot R_{ex}}{z_{2e\beta}^2}$	3.1.21	-	0,026	0,042	0,057	0,072	0,088
$C_E = \sqrt{C_{EA}^2 + C_{EP}^2}$	3.1.19	-	1,041	1,044	1,049	1,053	1,059
$U_1 = C_E \cdot E_1$	3.1.18	В	1061,08	1066,05	1071,77	1078,22	1078
Δ	5.1.1	%	0,18	0,24	0,24	0,23	0,18

Так само як і при визначенні фазної напруги U_1 , так і при знаходженні робочих характеристик величина похибки незначна, що у експлуатації не відображається на режимі роботи.

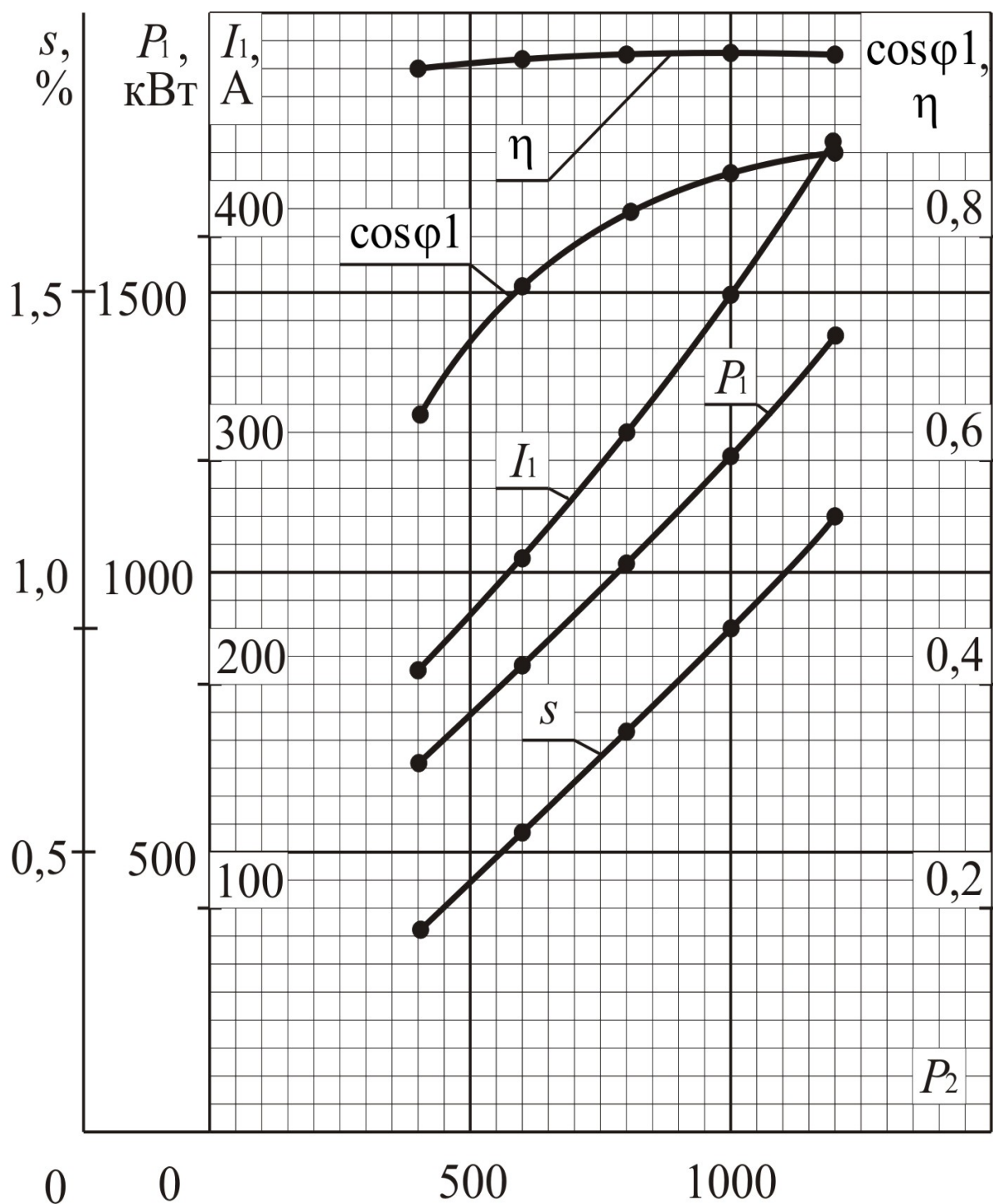


Рисунок 5.1.2 – Робочі характеристики асинхронного тягового двигуна АД914У без урахування степені насичення магнітної системи

Змн.			Таблиця 5.1.7 – Розрахунок робочих характеристик					
Арк.								
№ докум.								
Підпис								
Дата								

Продовження таблиці 5.1.7

$P_{el} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_1^2 \cdot 10^{-3}$	4.2.13	кВт	4,329	6,749	10,126	14,467	20,002
$I_0 = \frac{E_1}{z_{MH}}$	4.2.14	А	151,00	151,19	151,40	151,63	150,78
$P_c = m_1 \cdot r_m \cdot I_0^2 \cdot 10^{-3}$	4.2.15	кВт	9,577	9,601	9,627	9,656	9,548
$P_{em} = P_{la} - P_{el} - P_c$	4.2.16	кВт	404,45	607,12	810,44	1014,48	1219,46
$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1$	4.2.18	А	651,98	817,85	1007,19	1211,11	1423,80
Δ	5.1.1	%	3,05	2,79	2,01	1,52	0,88
$M = \frac{p \cdot P_2}{2 \cdot \pi \cdot (f_1 - f_2)}$	4.2.17	кНм	3,428	5,152	6,882	8,618	10,362

5.2 Розрахунок електротягових характеристик без урахування степені насичення магнітної системи

Розрахунок електротягових характеристик без урахування степені насичення магнітної системи будемо проводити аналогічно тому, як це робили у пункті 4. Відмінністю буде лише те, що значення опорів x_{mn} та r_{mn} будуть незмінними і такими, що відповідають номінальним значенням.

Розрахунок також, як і в пункті 4, почнемо з визначення дійсного значення частоти f_2 скориставшись тією ж схемою, що і для визначення робочих характеристик двигуна. Тому наводити приклад розрахунку також не є доцільним. Розрахунок виконаємо для частот струму статора в межах 0 – 140 Гц при заданих початкових умовах: $M = 10400 \text{ нМ}$, $U_{1н} = 1080 \text{ В}$, $P_{2н} = 1200 \text{ кВт}$.

Дані розрахунку занесу до зведеної таблиці 5.2.1 та 5.2.2

По даним таблиці 5.2.1 та 5.2.2 будуємо графік залежності $f_2 (U_1)$ рисунок 5.2.1 із якого і знаходимо дійсно реалізуючі значення частоти f_2 . Саме для цих значень частоти і проведемо розрахунок електротягових характеристик, який покажемо у таблиці 5.2.3.

						Арк.
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.2.1 – Знаходження дійсно реалізує мого значення частоти f_2 при швидкості 80, 100 та 120 км/год

ν	км/год	80				100				120			
f_2	Гц	0,5	0,75	1,0	1,5	0,5	0,75	1,0	1,5	0,5	0,75	1,0	1,5
f_1	Гц	70,22	70,47	70,72	71,22	87,65	87,9	88,15	88,65	105,08	105,33	105,58	106,08
$p_{мех}$	кВт	1,437	1,440	1,443	1,449	1,850	1,858	1,866	1,875	2,300	2,306	2,313	2,325
$x_{мн}$	Ом	6,75											
$r_{мн}$	Ом	0,135											
U_I	В	1316,59	1085,48	959,84	808,6	1472,2	1222,2	1080,1	927,07	1609,8	1335,08	1178,8	1010,08

Таблиця 5.2.2 – Знаходження дійсно реалізує мого значення частоти f_2 при швидкості 140 та 160 км/год

ν	км/год	140				160			
f_2	Гц	0,5	0,75	1,0	1,5	0,5	0,75	1,0	2,0
f_1	Гц	122,51	122,76	123,01	123,51	139,94	140,19	140,44	141,44
$p_{мех}$	кВт	2,675	2,688	2,700	2,725	3,125	3,144	3,163	3,200
x_{MH}	Ом	6,75							
r_{MH}	Ом	0,135							
U_I	В	1736,50	1430,19	1269,89	1086,82	1841,45	1511,89	1317,46	960,55

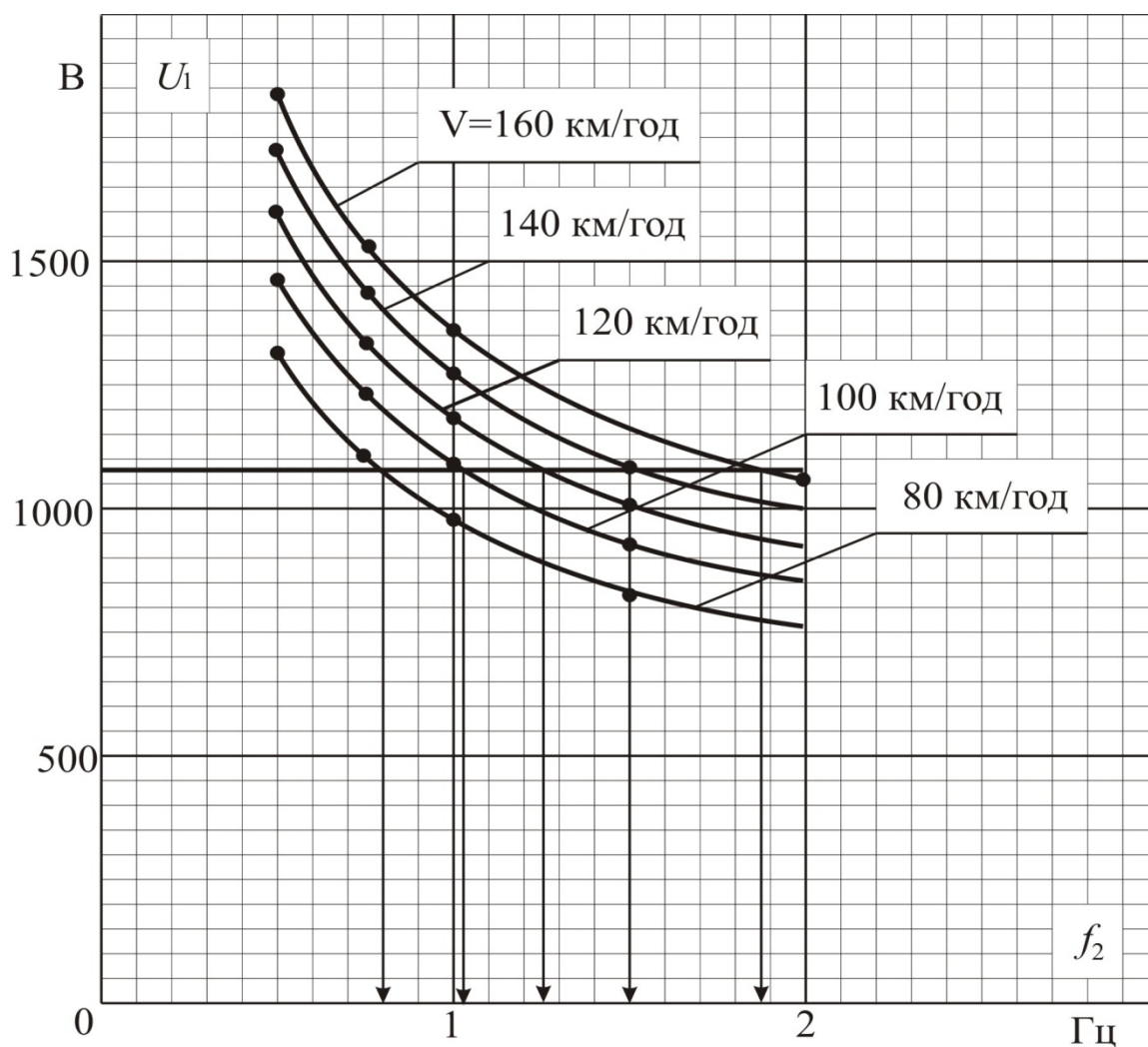


Рисунок 5.2.1 – Залежність напруги статора від частоти ротора при різних значеннях реалізуючої швидкості руху без врахування степені насичення магнітної системи

Таблиця 5.2.3 – Результати розрахунків електротягових характеристик

U_1	В	636,94	869,23	1080	1080	1080	1080	1080	1080
v	км/год	20	40	63,43	80	100	120	140	160
f_2	Гц	0,609	0,609	0,609	0,8	1,03	1,26	1,50	1,88
f_1	Гц	18,04	35,47	35,47	70,52	88,13	105,84	123,51	141,32
Φ	Вб	0,092	0,092	0,092	0,072	0,057	0,047	0,04	0,033
F_k	Н	18918	18918	18918	14999	11999	9999	8571	7499
E_1	В	585,25	813,58	1017,97	1017,97	1017,97	1017,97	1017,97	1017,97
P_2	кВт	378,36	756,72	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Розраховані характеристики покажемо на рисунку 5.2.2.

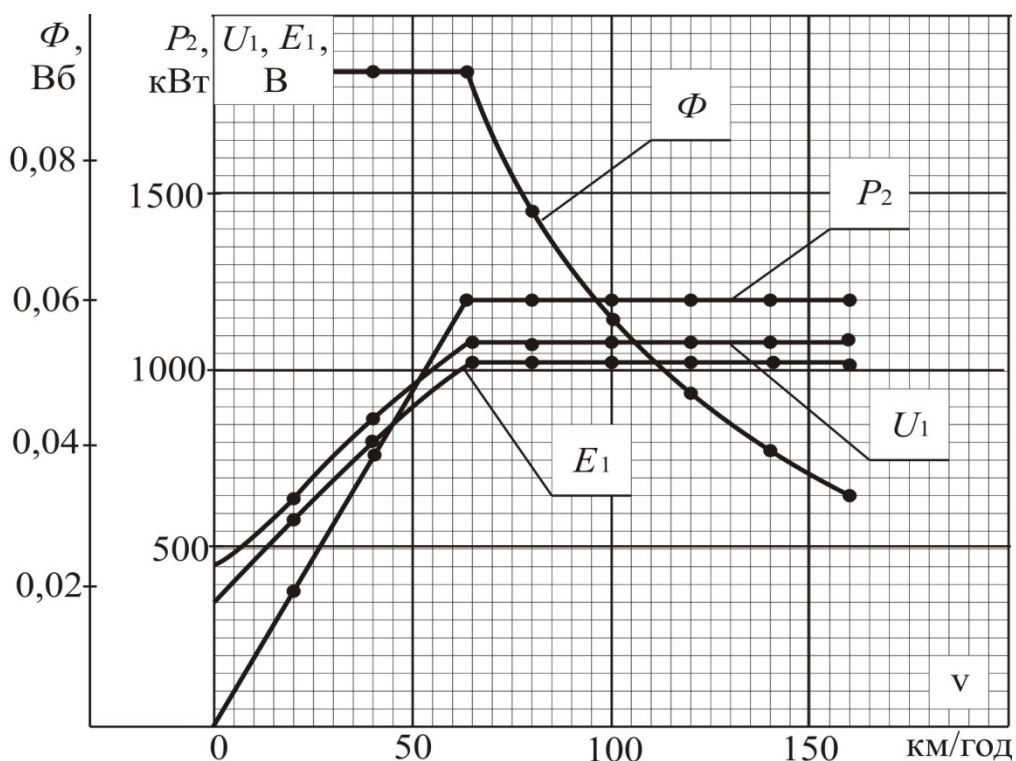
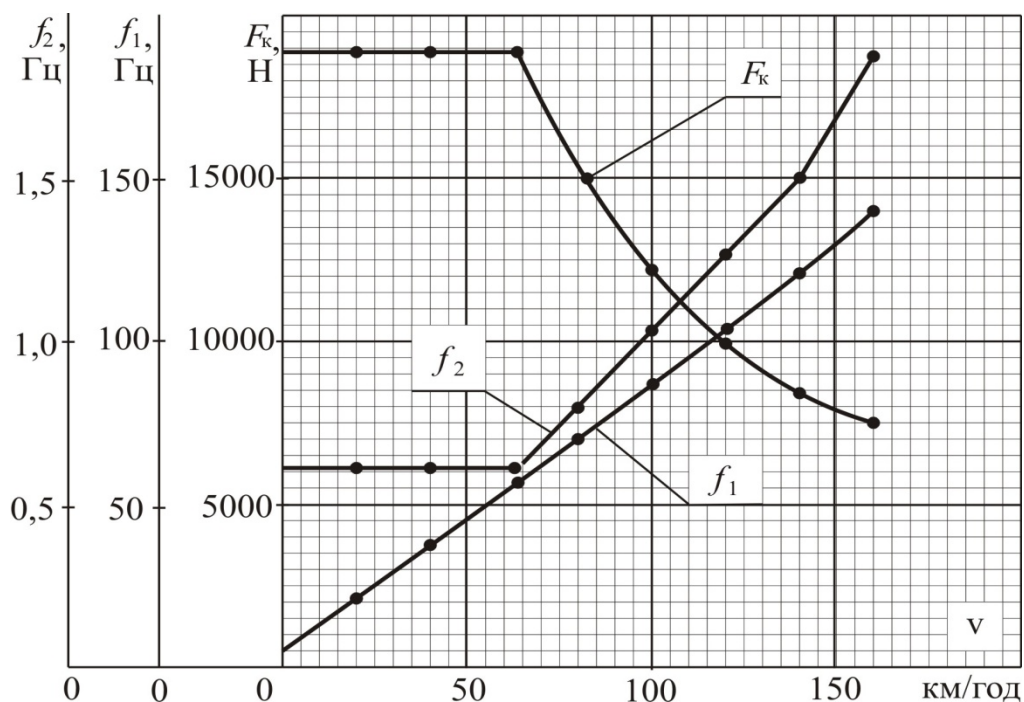


Рисунок 5.2.2 – Криві зміни параметрів режиму тягового двигуна АД-914У в залежності від швидкості без урахуванням степені насичення

Для оцінки похибки розрахунків, яка утворюється при нехтуванні ступенем насичення магнітної системи розглянемо дві точки, де ця похибка буде найбільшою, тобто там, де машина найбільше намагнітилася, тобто при $v=160$ км/год. Для цього здійснимо розрахунок, окрім деяких пунктів, згідно схеми приведеної на рисунку 4.2.1.

Результати розрахунків занесемо до таблиці 5.2.4

Таблиця 5.2.4 – Оцінка похибки розрахунку

v	км/год	З урахуванням насичення магнітної системи	Без урахування насичення магнітної системи	Похибка, %
f_2	Гц	1,55	1,88	21,3
I_1	А	426,7	477,4	11,9
I_{1a}	А	391,3	424,4	8,5
η	-	0,96	0,955	0,52
I_0	А	107,36	137,02	27,63
$\cos\varphi$	-	0,917	0,889	3,14

У результаті порівняння розрахунків приведених у таблиці 5.2.4 бачимо, що у випадку розрахунку характеристик з урахуванням ступені насичення магнітної системи значення розрахованих параметрів відрізняються від значення цих же параметрів без урахування ступені насичення магнітної системи. Величина похибки коливається у різних межах і у певних випадках досягає недопустимого значення. Отже, ми підтвердили те, що при розрахунку характеристик необхідно враховувати ступінь насичення магнітної системи, бо в іншому випадку у розрахунок буде вноситися велика похибка, що відобразиться на роботі машини.

Висновки

В дипломній роботі було викладено обґрунтування методики визначення характеристик електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом. На даному етапі розвитку залізничного транспорту ведеться багато науково-дослідницьких робіт по знаходженню характеристик, але до цього часу не існує однозначної думки відносно методики розрахунку характеристик.

У ході виконання роботи було:

- запропоновано методику розрахунку характеристик регульованих частотою асинхронних тягових двигунів, яка враховує зміну ступеня насичення магнітної системи.

- здійснено розрахунок робочих характеристик з урахуванням і без урахування зміни ступеня насичення магнітної системи. У результаті порівняння цих характеристик виявлено, що величина розбіжності у визначенні коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ не перевищила 4%, струму статора I_1 – 3%, коефіцієнта корисної дії η – 1%, потужності P_1 – 4%. Значення цих похибок підтверджує можливість розрахунку робочих характеристик при постійних параметрах схеми заміщення асинхронної машини.

- здійснено розрахунок електротягових характеристик з урахуванням і без урахування зміни ступеня насичення магнітної системи. При їх порівнянні розбіжність у частоті струму ротора f_2 складає 21,3%, струму статора I_1 – 11,9 %, активної складової струму статора – 8,5%, коефіцієнта корисної дії η – 0,52 %, струму холостого ходу I_0 – 27,63%, коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ – 3,14%.

Приведені результати підтверджують те, що при розрахунку характеристик регульованих частотою асинхронних тягових двигунів необхідно враховувати зміну ступеня насичення магнітної системи, оскільки нехтування ним вносить великі похибки в розрахунок.

Список використаних джерел

- 1 Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. - Л.: Энергия, 1978. - 832 с.
- 2 Гетьман Г.К. Теорія електричної тяги. Том 1. –Днепропетровск, 2014.– 580 с.
- 3 Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А.А. Булгаков.– М.: Транспорт, 1966.–296 с.
- 4 Сергеев П.С. Проектирование электрических машин / П.С Сергеев, Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов . - М.: Энергия, 1969. - 632 с.
- 5 Рихтер Р. Электрические машины. Том IV: Индукционные машины / Р. Рихтер – ГИОТИ, 1939.–472 с.
- 6 Винокуров В.А. Электрические машины железнодорожного транспорта. / В.А. Винокуров , Д.А. Попов. - М.: Транспорт, 1986. - 512 с.
- 7 Ротанов Н. А. Проектирование систем управления подвижным составом электрических железных дорог/ Н. А Ротанов, Д. Д. Захарченко. – М.:Транспорт, 1964.–348 с.
- 8 Курбасов А.С. Проектирование тяговых электродвигателей / А.С. Курбасов, В.И. Седов, Л.Н. Сорин. - М.: Транспорт, 1987. - 536 с.
- 9 Бочаров В. И. Магистральные электровозы: Технологические основы производства / В. И. Бочаров, А. И Каргин –М.: Машиностроение, 1992. –254 с.

						Арк.
						114
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список демонстраційних матеріалів

						Арк.
						115
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		