

ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Телюта Руслан Васильович

**РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ РЕЖИМИ РОБОТИ
СИСТЕМИ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН – РОБОЧА МАШИНА В
УМОВАХ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник

Овчаров Володимир Васильович,

доктор технічних наук,

професор

Мелітополь – 2011

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ З АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ	12
1.1 Стан питання контролю експлуатаційних режимів роботи асинхронних електроприводів	12
1.1.1 Характеристика умов експлуатації асинхронних електродвигунів в агропромисловому комплексі	12
1.1.2 Механізм розвитку процесів ушкодження ізоляції асинхронних електродвигунів в експлуатації	15
1.1.3 Характеристика існуючих методів і засобів контролю режимів роботи й захисту асинхронних електродвигунів в агропромисловому комплексі.....	17
1.2 Стан і шляхи вирішення проблеми енергозбереження в електроприводах сільськогосподарських машин	22
1.2.1 Тенденції розвитку сільськогосподарського електропривода.....	22
1.2.2 Визначення потужності електродвигунів	26
1.2.3 Обмеження холостого ходу електропривода, заміна недовантажених електродвигунів	27
1.2.4 Оптимізація режимів роботи електропривода при змінних навантаженнях	28
1.2.5 Заходи економії електроенергії в системах виробництва стиснутого повітря і холоду	32
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІ	34
2.1 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції потужності на валу	34

2.2 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції ковзання електродвигуна	44
2.3 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції завантаження на валу з боку робочої машини	49
2.4 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції рівня напруги живлення й завантаження на валу з боку робочої машини	57
2.5 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції асиметрії напруги й завантаження на валу з боку робочої машини	78
2.6 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні при неповнофазному живленні	84
2.7 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції температури навколишнього середовища й завантаження на валу з боку робочої машини	88
2.8 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у квазісталому режимі	91
2.9 Висновки	94
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТИ РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА	98
3.1. Закономірності теплового старіння ізоляції електричних машин	98
3.2 Аналіз впливу графіка навантаження на процес теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна	101
3.3 Дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна у функції завантаження на валу з боку робочої машини	105
3.4 Дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна у функції рівня напруги живлення й завантаження на валу з боку робочої машини	109
3.5 Висновки	113

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ДІАГНОСТУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ «ЕЛЕКТРОДВИГУН – РОБОЧА МАШИНА»	114
4.1 Методика діагностування режиму роботи електродвигуна.....	114
4.2 Діагностування механічної частини системи «електродвигун – робоча машина»	116
4.3 Діагностування роботоздатності асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором	118
4.4 Висновки	120
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ І ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	121
5.1 Перевірка математичної моделі втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні	121
5.2 Математична модель енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна	123
5.3 Розробка пристрою забезпечення енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна	124
5.4 Техніко – економічне обґрунтування пристрою забезпечення енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна	125
5.5 Висновки.....	126
ВИСНОВКИ	127
ДОДАТКИ	129
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	132

ВСТУП

В агропромисловому комплексі електроенергія є основою стаціонарних технологічних процесів. Тому стан електрообладнання, поряд з надійністю електропостачання, багато в чому визначає результати господарської діяльності.

На сьогоднішній момент в якості електропривода на потокових технологічних лініях агропромислового комплексу використовується асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором. В агропромисловому комплексі в цілому асинхронні електродвигуни становлять близько 95% загальної кількості. На них доводиться більше половини споживання електричної енергії галузі. При цьому для більшості електрифікованих сільськогосподарських машин необхідні електродвигуни потужністю від 0,1 до 10 кВт, і тільки для деяких - понад 10 кВт (1 - 4).

Широке поширення в агропромисловому комплексі асинхронний електродвигун одержав завдяки своїй високій конструкційній надійності. Але практика показує, що експлуатаційна надійність цих двигунів не задовольняє в достатній мірі вимогам виробництва, тому що спостерігається порівняно високий відсоток виходу їх з ладу із-за специфічних умов експлуатації в агропромисловому комплексі, які не можуть бути враховані при проектуванні двигунів.

Це приводить до незапланованих матеріальних витрат із-за порушення технологічних процесів, що відбивається на кількісних і якісних показниках виробництва. Крім того, для відновлення електродвигунів затрачається певна кількість матеріалів (мідного проводу, електротехнічної сталі, ізоляційних матеріалів), електроенергії й робочого часу. Тому щорічні витрати на ремонт електродвигунів у агропромисловому комплексі продовжують збільшуватися пропорційно числу електричних машин у господарствах [1, 5 - 16] .

Причини відмов асинхронних електродвигунів згідно [1, 7, 16 - 19] можна класифікувати в такий спосіб :

- недоліки конструкції - 15%;
- невідповідність двигуна умовам експлуатації - 35%;
- системи експлуатації - 50% (близько 70% з них – несвоєчасне проведення

профілактичних і захисних заходів, тобто головним чином - незадовільний захист і низький рівень технічного сервісу двигуна).

Одночасно з аварійними режимами роботи електродвигунів відбуваються додаткові втрати активної енергії, які приводять до перегріву електродвигунів.

Таким чином, існує *народногосподарська проблема* підвищення експлуатаційної надійності асинхронних електродвигунів потокових технологічних ліній і зменшення втрат активної потужності як при аварійних режимах, так і при недовантаженні електродвигунів.

Суть проблеми: у середньому на потокових технологічних лініях агропромислового комплексу щорічно відмовляють 20 – 25% наявного парку асинхронних електродвигунів, а завантаження електродвигунів в нормальних режимах роботи складає від 40 до 60% їх потужності.

Негативні наслідки: незаплановані витрати, пов'язані з раптовою зупинкою технологічних ліній, а також на ремонт асинхронних електродвигунів, додаткові втрати активної енергії.

Причини існування проблеми: недостатній рівень експлуатації асинхронних електродвигунів, зокрема – недосконалість контролю, діагностування й захисту електродвигунів.

Шлях рішення проблеми: підвищення рівня експлуатації шляхом об'єктивного безперервного контролю, діагностування й надійного захисту асинхронних електродвигунів, що працюють на потокових технологічних лініях.

В існуючій системі планово–попереджувального ремонту електроустаткування в сільському господарстві *планове діагностування* проводиться для визначення загального стану електродвигуна й полягає в контролі узагальненого параметра (найчастіше – опору ізоляції обмотки статора), а також у візуальному контролі стану двигуна (зовнішнім оглядом). *Позапланове діагностування* виконується при виробничому технічному обслуговуванні й полягає в можливому визначенні причини несправності електродвигуна й у візуальному контролі його стану.

Функціональне діагностування асинхронного електродвигуна здійснюється з початку й протягом його експлуатації. Воно полягає в безперервному контролі

зміни одного або декількох параметрів процесу, що характеризує ушкодження й зношування електродвигуна, у своєчасній подачі сигналу обслуговуючому персоналу про ненормальний процес у двигуні з метою подальшого більш глибокого його діагностування й пов'язаних з ним систем у технологічні паузи. Відключення асинхронного електродвигуна відбувається в тому випадку, коли подальша його робота в такому режимі може привести до різкого погіршення його стану або до виходу з ладу до закінчення технологічного процесу.

Переваги діагностування асинхронних електродвигунів відповідно до системи планово–попереджувального ремонту електроустаткування в сільському господарстві:

- дозволяє визначити найбільш імовірні несправності;
- дозволяє скоротити час поточного ремонту;
- дозволяє підвищити якість виконання технічного обслуговування й поточного ремонту.

Недоліки діагностування асинхронних електродвигунів відповідно до системи планово – попереджувального ремонту електроустаткування в сільському господарстві:

- високі витрати часу й засобів діагностування;
- відсутність повного контролю стану електродвигунів у середньому протягом 1 року;
- технологія діагностування дозволяє визначати несправності у вузлах електродвигуна, але не дозволяє визначати, як цей двигун буде функціонувати в заданому режимі роботи.

Шляхи усунення недоліків діагностування асинхронних електродвигунів:

- удосконалювання існуючого математичного апарату оцінки процесу зношування ізоляції електродвигунів (використання результатів діагностування не тільки в якості прямих діагностичних показників для прямого порівняння, а й для розрахунку непрямих показників);
- розробка нових рішень керування режимами роботи електродвигунів.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Аналізуючи результати експлуатації електрообладнання в агропромисловому комплексі, приходимо до висновку, що аварійність основного елементу електропривода – трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором – ще висока, що приводить до значних збитків у сільськогосподарському виробництві.

Окрім цього в електроприводах робочих машин в процесі експлуатації відбуваються значні втрати активної енергії.

Тому дослідження, які направлені на вивчення особливостей режимів роботи асинхронних електродвигунів при сукупному впливі експлуатаційних показників і на розробку ресурсоенергозберігаючих режимів роботи останніх та технічних засобів керування роботою системи «електродвигун – робоча машина» є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана відповідно до плану науково-дослідної роботи Таврійського державного агротехнологічного університету на 2005 – 2010 роки за науково-технічною програмою №1 «Розробка наукових систем, технологій і технічних засобів для задоволення технічної безпеки Південного регіону України» (державний реєстраційний номер 0102U000678), підпрограмою 1.6. «Розробка методів і засобів технічного сервісу електрообладнання та ресурсоенергозбереження», напрямком 1.6.4. «Розробка пристрою функціонального діагностування електродвигунів».

Мета і завдання дослідження

Мета роботи: підвищення експлуатаційної надійності асинхронних електродвигунів та зменшення втрат активної енергії в системі «електродвигун – робоча машина» за рахунок використання електромеханічних систем управління на базі розроблених ресурсоенергозберігаючих режимів роботи електродвигунів.

Завдання дослідження:

- провести аналіз проблеми ресурсоенергозбереження в електроприводах з асинхронними електродвигунами;
- аналітично дослідити втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні;
- дослідити витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна;
- розробити систему діагностування режимів роботи асинхронного електродвигуна і управління ним;
- експериментально перевірити отримані результати і техніку – економічно їх обґрунтувати.

Об'єкт дослідження: процес перетворення енергії в асинхронному електродвигуні.

Предмет дослідження: закономірності втрат активної енергії та витрат ресурсу ізоляції електродвигуна в функції експлуатаційних впливів.

Методи дослідження.

Дослідження проводились з використанням символічного методу аналізу електричних кіл, кругових діаграм, симетричних складових напруг і струмів, методів аналізу лінійних електричних кіл.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Отримала подальший розвиток теорія втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні з короткозамкненим ротором з уточненням схеми заміщення

фази двигуна та врахування росту активного опору провідників обмотки при нагріванні.

2. Вперше запропоновано визначення втрат активної потужності в електродвигуні шляхом використання кругової діаграми комплексу повної потужності в функції ковзання електродвигуна.

3. Отримала подальший розвиток теорія втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні приводу робочої машини з урахуванням коефіцієнта завантаження останньої, рівня напруги, симетричності живлення.

4. Вперше запропоновано коефіцієнт втрат активної енергії та витрат ресурсу в якості інтегрального критерію енергоресурсозберігаючих режимів роботи асинхронних електродвигунів.

Практичне значення отриманих результатів

На підставі результатів дослідження розроблено пристрій функціонального діагностування режимів роботи системи « електродвигун – робоча машина» з урахуванням втрат електричної енергії в системі витрат ресурсу ізоляції трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором .

За результатами досліджень розроблена проектно-конструкторська документація на пристрій функціонального діагностування режимів роботи системи « електродвигун – робоча машина», виготовлено експериментальний зразок.

Особистий внесок здобувача

В [1] розроблена уточнена Γ – образна схема заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна, отримано залежності, які враховують зростання активного опору провідників обмотки при нагріванні. В [2] запропоновано метод дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні за допомогою кругової діаграми комплексу повної потужності втрат енергії у функції ковзання. В [3] запропоновано аналіз втрат активної потужності в асинхронному електрод-

вигуні за допомогою коефіцієнта втрат. В [5] запропоновано метод дослідження втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні.

Апробація результатів дисертації

Основні положення й результати дисертаційної роботи заслуховувалися й обговорювалися на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів і студентів (місто Мелітополь, ТДАТУ, 1998 – 2010 роки; місто Харків, ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2009, 2010 роки), міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика в АПК» (місто Мелітополь, ТДАТА, 2002 рік).

Публікації

По роботі опубліковано шість наукових праць у фахових виданнях.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається з п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 153 найменувань та додатків. Обсяг основного тексту складає 128 сторінок, містить 60 ілюстрацій і 38 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 148 сторінки.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ЕЛЕКТРОПРИ- ВОДАХ З АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ

1.1 Стан питання контролю експлуатаційних режимів роботи асинхронних електроприводів

1.1.1 Характеристика умов експлуатації асинхронних електродви- гунів в агропромисловому комплексі

Експлуатаційна надійність асинхронних електродвигунів у значній мірі визначається надійністю їхніх обмоток, що, у свою чергу, залежить від стану ізоляції. У процесі експлуатації асинхронні електродвигуни піддаються цілому ряду експлуатаційних впливів, які можна розділити на два класи: режимні й кліматичні. Експлуатаційна надійність асинхронних електродвигунів при кліматичних впливах (у першу чергу вологості й агресивності середовища) визначається конструкційною надійністю й у даній роботі не розглядається. До експлуатаційних впливів режимного характеру відносяться:

- перевантаження з боку робочої машини;
- зниження, підвищення й несиметрія напруги мережі;
- неповнофазний режим;
- перекидання електродвигуна під напругою;
- погіршення умов охолодження;
- підвищення температури навколишнього середовища.

Перевантаження електродвигунів нерідко пов'язані з недосконалістю робочих машин і механізмів, причиною чого є відсутність засобів автоматизації й контролю навантаження, наприклад, дробарок, кормороздавачів. Ряд механізмів, наприклад, дробарки, шнеки, норії часом включають під навантаженням, узимку часто змерзаються рухливі частини робочих машин, вони ж нерідко збільшують масу за рахунок прилипання залишків кормів, гною й тому подібного, у результаті

чого збільшуються сили тертя й махові моменти. Усілякі перекоси, зношення, погіршення змащення частин, що труться, ускладнюють рухливість робочих органів, збільшують тертя. Все це веде до перевантажень двигунів, до затяжних пусків, до роботи в режимі перекидання. Тому, незважаючи на неповну середню завантаженість електродвигунів у сільському господарстві (коефіцієнт завантаження становить 0,5 - 0,8), значна частина їх виходить із ладу через перевантаження [5].

Особливо небезпечним експлуатаційним впливом для ізоляції асинхронних електродвигунів є надструм. Затяжні пуски, перекидання електродвигунів, що виникають при зниженні напруги, неповнофазні режими, заклинювання робочих машин приводять до виникнення надструму.

У зв'язку з тим, що навантаження мають явно виражений сезонний характер, а потужність окремих споживачів часто порівнянна з потужністю трансформаторів, при відсутності регуляторів напруги й великої довжини мереж 0,38 кВ напруга в сільських мережах змінюється в значних межах: при живленні від державних систем електропостачання – від $0,85U_n$ до $1,15U_n$, а при живленні від власних електростанцій – від $0,8U_n$ до $1,2U_n$. У моменти пуску двигунів, особливо в умовах порівнянної потужності, напруга знижується до $0,65U_n$ [5]. Крім того, спостерігається нерівномірне навантаження по фазах, що супроводжується перекосами напруги. Все це також приводить до теплових перевантажень електродвигунів.

Для виникнення такого експлуатаційного впливу, як неповнофазний режим, може бути дуже багато причин: перегорання одного із запобіжників на щиті трансформаторної підстанції, обрив лінії електропередачі, ушкодження контакту пускової апаратури, ушкодження контакту в коробці електродвигуна, ушкодження жили живильного кабелю, окислювання алюмінієвого проводу в місцях контакту (особливо у тваринницьких приміщеннях) і тому подібне [28]. Досить часто при експлуатації електродвигунів спостерігається погіршення умов охолодження через засмічування поверхонь електродвигунів продуктами переробки, зняття вентиляторів.

Ізоляція обмоток асинхронних електродвигунів піддається впливу комутаційних перенапруг, які можуть досягати десятикратного (і більше) значення в порівнянні з номінальною напругою, що є в більшості випадків безпосередньою причиною міжвиткових замикань. Комутаційні перенапруги являють собою випадкові явища й мають статистичний характер. Імовірність їхнього виникнення залежить від числа комутаційних операцій, що, у свою чергу, пропорційно часу роботи електродвигунів.

Руйнівним фактором експлуатаційного впливу для ізоляційної конструкції асинхронних електродвигунів є вібрація. Дія вібрації на обмотки виражається в поступовому руйнуванні лаку, у результаті чого порушується цементація обмотки й окремі провідники здобувають деяку волю переміщення. Це веде до руйнування виткової ізоляції в точках дотику сусідніх провідників. Вимір величини вібраційного зсуву (подвоєне значення амплітуди коливання) електродвигунів [5] показало, що воно має широкий діапазон значень у межах від 0,005 мм до 0,09 мм. Частота вібрації більшості корпусів електродвигунів виявилася рівною 50 Гц. Особливо характерна вібрація для електродвигунів робочих машин типу дробарок. Сильний експлуатаційний вплив на асинхронні електродвигуни в сільському господарстві робить волога й хімічно активні середовища. Волога проникає в ізоляцію електродвигунів головним чином у періоди їхнього неробочого стану. Особливо інтенсивно цей процес іде під час остигання машини, тому що в цей період тиск у порах і капілярах ізоляції трохи нижче атмосферного. Мала в'язкість і інші властивості води сприяють її прониканню в дрібні пори й гідролітичному руйнуванню ізоляційних матеріалів, розщепленню полімерних ланцюгів. Опір ізоляції і її електрична міцність знижуються й створюються передумови для появи струмів витoku.

Шкідливу дію на ізоляцію роблять хімічно активні речовини. Загазованість стійлових тваринницьких приміщень аміаком, вуглекислим газом, сірководнем приводить до швидкого псування ізоляції електродвигунів.

Процеси старіння ізоляції від різних експлуатаційних впливів активізуються й прогресують. Ізоляційні конструкції, що пройшли період приробітки й не мають

більших прихованих дефектів, у край рідко відмовляють внаслідок раптового пробою. Руйнування ізоляції відбувається поступово, причому ініціююча роль належить процесам теплового старіння. Навіть при порівняно невисоких температурах ізоляції, коли термоокислювальна деструкція незначна, під дією тепла відбувається всихання, випар летучих компонентів, зменшення еластичності ізоляції, підвищення її крихкості. Останнє сприяє розвитку процесів механічного старіння. В ізоляції з'являються тріщини й інші дефекти, вона розшаровується й розпушується, що створює умови для виникнення іонізаційних явищ. Руйнування ізоляції відбувається нерівномірно й завершується пробоем у найбільш слабкому місці. Волога й агресивні середовища сприяють прискоренню й активізації процесів старіння [29].

Таким чином, двигуни в умовах сільськогосподарського виробництва витримують експлуатаційні впливи графіка навантаження; температури навколишнього середовища; перевантажень, викликаних особливостями робочої машини; пускових режимів (тривалість, частота); відхилення напруги на затискачах; несиметрії напруги на затискачах; зміни умов охолодження (засмічування поверхонь корпусів, робота без вентилятора); комутаційних перенапруг у живильній мережі й виникаючих у ланцюзі електродвигуна при пусках і відключеннях; поштовхів, вібрацій, ударів з боку робочих машин; вологості навколишнього середовища; агресивних середовищ.

1.1.2 Механізм розвитку процесів ушкодження ізоляції асинхронних електродвигунів в експлуатації

Обмотка статора асинхронного електродвигуна є самим уразливим елементом конструкції електричних машин. У свою чергу, в обмотках електричних машин самим уразливим елементом є їхня ізоляційна конструкція. Тому надійність електродвигуна в основному визначається надійністю ізоляційної конструкції

(ізоляції). Аналіз робіт [29 - 76] дозволяє представити механізм розвитку процесів ушкодження ізоляції електричних двигунів в експлуатації.

Будь-який асинхронний електродвигун містить у собі дефекти виготовлення, які можна розділити на дві групи: дефекти проектування; дефекти технології виробництва.

Дефекти проектування є загальними для всіх електродвигунів одного типу-розміру. До них можна віднести високий коефіцієнт заповнення пазів; малий запас теплостійкості ізоляції; малий повітряний зазор; недостатню твердість конструкції.

Дефекти технології виробництва носять як загальний, так і індивідуальний характер. До них відносяться низька якість матеріалів і комплектуючих виробів; локальні дефекти ізоляції провідників обмотки; недосконалість технології виготовлення секцій; недосконалість технології укладання секцій у паз; дефекти пайки контактів; недосконалість просочення й сушіння обмотки; дефекти матеріалів корпусної ізоляції; недосконалість виготовлення сердечника статора.

Рівень наведених дефектів для кожного електродвигуна носить випадковий характер, що визначає індивідуальну конструкційну надійність. Початкові дефекти технологічного походження можуть одержати подальший розвиток аж до відмови залежно від умов експлуатації, що представляють собою сукупність експлуатаційних впливів. Так, наприклад, недосконалість центрування двигуна, поштовхи, удари, вібрації з боку робочої машини приводять до вібрації обмотки, у результаті чого розвиваються локальні дефекти виткової ізоляції.

Перевантаження електродвигуна через особливості робочої машини, пускові режими електродвигуна (їхня тривалість, частота), відхилення напруги на затискачах від номінального значення або несиметрія напруги на затискачах, випадання фази приводять до перевантаження електродвигуна по струму. Перевантаження електродвигунів по струму, підвищення температури навколишнього середовища, погіршення умов охолодження електродвигуна (засмічування, робота без вентилятора) приводять до перегріву виткової ізоляції, у результаті чого збільшується її теплове зношування, знижується опір виткової ізоляції, що приводить до

подальшого розвитку її локальних дефектів. На зниження опору виткової ізоляції впливають висока вологість навколишнього середовища і її агресивність.

Пускові режими електродвигуна (тривалість, частота), комутаційні перенапруги в живильній мережі приводять до комутаційних перенапруг виткової ізоляції, що також сприяє розвитку її локальних дефектів.

Перевантаження по струму електродвигуна, особливо викликані пусковими режимами, приводять до термомеханічних процесів, що також збільшують локальні дефекти виткової ізоляції.

Розвиток локальних дефектів виткової ізоляції в лобових і пазових частинах приводить спочатку до незавершених пробоїв, а згодом до повних виткових замикань і відмови електродвигуна. Паралельно із цим розвиваються ушкодження корпусної ізоляції, які спочатку приводять до локальних дефектів, а потім переходять у незавершені пробої й повні замикання на корпус, що приводять також до відмови електродвигуна.

1.1.3 Характеристика існуючих методів і засобів контролю режимів роботи й захисту асинхронних електродвигунів в агропромисловому комплексі

Аналіз методів і засобів діагностування режимів роботи асинхронних електродвигунів показує, що за параметри діагностування приймають силу струму (максимального, прямої, зворотної, нульової послідовностей), кількість тепла, що виділяється в результаті теплової дії струму; діюче значення напруги (прямої, нульової і зворотної послідовності), температуру (обмоток статора, сталі статора й корпуса).

Найпоширенішим пристроєм діагностування режиму роботи асинхронного електродвигуна є теплове реле. В [5] виведена залежність припустимого часу роботи електродвигуна із заданим коефіцієнтом перевантаження:

$$t = T_{\text{э}} \ln \frac{\tau_{\text{нач}}(1 + a - \alpha \tau_{\text{н}} k^2) - \tau_{\text{н}}(a + k^2(1 + \alpha(\vartheta_{\text{ср}} - \vartheta_{\text{р}})))}{(\vartheta_{\text{н}} - \vartheta_{\text{ср}})(1 + a - \alpha \tau_{\text{н}} k^2) - \tau_{\text{н}}(a + k^2(1 + \alpha(\vartheta_{\text{ср}} - \vartheta_{\text{р}})))}, \quad (1.1)$$

де $T_{\text{э}}$ – еквівалентна постійна часу нагрівання обмотки електродвигуна, с;

$\tau_{\text{нач}}$ – початкове перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища, °С;

a – коефіцієнт втрат (відношення постійних втрат в електродвигуні при номінальній напрузі до змінних втрат при номінальному струмі);

α – температурний коефіцієнт опору матеріалу провідника, 1/°С;

$\tau_{\text{н}}$ – номінальне перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища, °С;

k – кратність струму перевантаження (відношення дійсної сили струму до номінального);

$\vartheta_{\text{ср}}$ – температура навколишнього середовища, °С;

$\vartheta_{\text{р}}$ – розрахункова температура обмотки, °С;

$\vartheta_{\text{н}}$ – номінальна (довгостроково припустима) температура для даного класу ізоляції, °С.

Вираз (1.1) отримано з умови, що гранично припустимою температурою нагрівання обмотки є номінальна її температура $\vartheta_{\text{н}}$.

Аналіз виразу (1.1) показує, що при заданій кратності перевантаження k час припустимої роботи електродвигуна t з умови припустимої температури обмотки $\vartheta_{\text{н}}$ є складною функцією еквівалентної постійної часу нагрівання $T_{\text{э}}$ (відомо, що для електродвигунів різної потужності вона різна), початкового перевищення температури обмотки $\tau_{\text{нач}}$ (воно носить випадковий характер), коефіцієнта втрат a (для електродвигунів різної потужності він різний), номінального перевищення температури обмотки $\tau_{\text{н}}$ (для різних класів нагрівостійкості ізоляції воно різне), температури навколишнього середовища $\vartheta_{\text{порівн}}$ (носить випадковий характер), розрахункової температури обмотки $\vartheta_{\text{р}}$ (для різних класів нагрівостійкості ізоляції

вона різна), номінальної температури обмотки ϑ_n (для різних класів ізоляції вона різна).

Там же отримано вираз захисної характеристики теплового реле:

$$t = T_{нэ} \ln \frac{\tau_{э.нач} (1 - \alpha \tau_{э.ногр} (k^2 - 1)) - \tau_{э.ногр} k^2}{(\vartheta_{э.ногр} - \vartheta_{ср}) (1 - \alpha \tau_{э.ногр} (k^2 - 1)) - \tau_{э.ногр} k^2}, \quad (1.2)$$

де $T_{нэ}$ - постійна часу нагрівання нагрівального елемента, с;

$\tau_{э.нач}$ - початкове перевищення температури нагрівального елемента, °С;

α - температурний коефіцієнт опору матеріалу нагрівального елемента, 1/°С;

$\tau_{э.ногр}$ - граничне значення перевищення температури нагрівального елемента, °С;

k - кратність струму перевантаження;

$\vartheta_{э.ногр}$ - гранична температура нагрівального елемента, °С;

$\vartheta_{ср}$ - температура навколишнього середовища, °С.

Аналіз виразу (1.2) показує, що час спрацьовування теплового реле при заданому значенні кратності перевантаження k з умови досягнення граничної температури нагрівального елемента $\vartheta_{э.ногр}$ є складною функцією постійною часу нагрівання нагрівального елемента $T_{нэ}$, початкового перевищення температури нагрівального елемента $\tau_{э.нач}$, температурного коефіцієнта опору нагрівального елемента α , граничного перевищення температури нагрівального елемента $\tau_{э.ногр}$, граничної температури нагрівального елемента $\vartheta_{э.ногр}$, температури навколишнього середовища $\vartheta_{порівн.}$

Порівнюючи між собою (1.1) і (1.2) можна зробити наступний висновок: перевантажувальна характеристика асинхронного електродвигуна, яка побудована за виразом (1.1), не може збігатися із захисною характеристикою теплового реле, яка побудована за (1.2). Це відбувається за наступними причинами:

- різні постійні часу нагрівання електродвигуна й теплового реле;
- різні температурні коефіцієнти опору матеріалів обмотки й нагрівального елемента;

– різні температури навколишнього середовища для електродвигуна й теплового реле;

– різні інші параметри, що характеризують обмотку електродвигуна й нагрівальний елемент теплового реле.

При роботі асинхронного електродвигуна в повторно-короткочасному режимі в [5] наведено вираз еквівалентної постійної часу нагрівання електродвигуна в зазначеному режимі:

$$T_{\varepsilon} = \frac{t_p + t_n}{\frac{t_p}{T} + \frac{t_n}{T_o}}, \quad (1.3)$$

де t_p і t_n – час роботи й час паузи протягом одного циклу, с;

T – постійна часу нагрівання електродвигуна, с;

T_o – постійна часу охолодження електродвигуна, с.

Аналіз виразу (1.3) показує, що еквівалентна постійна часу нагрівання T_{ε} в повторно-короткочасному режимі залежить від тривалості робочого часу t_p і періоду паузи t_n , а також від величини постійної часу нагрівання T и постійної часу охолодження T_o електродвигуна. На відміну від електродвигуна в теплового реле постійні часу нагрівання й охолодження рівні між собою. Тому перевантажувальна характеристика електродвигуна й захисна характеристика теплового реле в повторно-короткочасному режимі роботи значно розходяться. Сказане вище, мабуть, відноситься й до інших режимів роботи з відключенням електродвигуна.

Якщо врахувати, що нагрівання електродвигуна залежить не тільки від величини струму, але й від інших втрат активної потужності в елементах конструкції електродвигуна, умов охолодження, температури навколишнього середовища, то можна стверджувати, що при невеликих перевантаженнях сила електричного струму може служити лише наближеним діагностичним параметром теплового процесу електродвигуна.

Аналіз робіт [77 - 88] показує, що теплове реле має цілий ряд інших недоліків, які не дозволяють ефективно захищати електродвигуни.

Використання реле струму для діагностування режиму роботи електродвигуна й захисту від роботи в аварійних режимах вимагає додаткової установки реле часу, це ускладнює пристрій, що особливо неекономічно для електродвигунів невеликої потужності.

Електромагнітні розчіплювачі автоматичних вимикачів відбудовують від пускових струмів, тому при надструмах електродвигуни залишаються незахищеними.

Розроблено велику кількість варіантів пристроїв для захисту асинхронного електродвигуна з використанням інших елементів [77 - 88], але кожне з них до кінця не вирішує питання ефективного захисту електродвигунів у силу недоліків самого методу.

Більш вдалим є метод діагностування режиму роботи електродвигуна по температурі обмотки. Починаючи з 1972 року, розроблена велика кількість таких температурних захистів [89 - 100].

Незважаючи на те, що ці пристрої більш об'єктивно контролюють режим роботи асинхронних електродвигунів, вони також не позбавлені недоліків:

- необхідність вмонтовувати перетворювачі температури в кожен з обмоток;
- необхідність прокладки двох додаткових проводів;
- необхідність контролю кола підключення перетворювачів до пристрою;
- відключення електродвигуна при випадкових (тимчасових) підвищеннях температури понад величину уставки при одночасних значних зниженнях температури в інші періоди роботи.

В [101 - 118] запропоновані непрямі методи оцінки теплового режиму роботи асинхронного електродвигуна (по напрузі прямої, зворотної й нульової послідовностей; по кількості фаз і іншим параметрам). При цьому досягається позитивний ефект від дії одного з експлуатаційних впливів, але не вирішується завдання, якщо одночасно діють кілька факторів аномального режиму.

Аналіз експлуатаційних режимів роботи асинхронних електродвигунів наведений у ряді робіт [120–126, 137–144], однак дуже мало робіт, спрямованих на розробку методів і засобів полегшення аварійних режимів, що забезпечують роботу

електродвигунів до завершення технологічного циклу з наступним їхнім діагностуванням у технологічну паузу.

Таким чином, аналіз стану питання дозволяє зробити наступні висновки:

- експлуатаційна надійність асинхронних електродвигунів потокових технологічних ліній в умовах агропромислового комплексу залишається невисокою;
- існуючі методи й технічні засоби контролю, діагностування й захисту асинхронних електродвигунів потокових технологічних ліній носять не груповий, а індивідуальний характер, і враховують, як правило, вплив тільки одного з експлуатаційних впливів;
- пристрої захисту асинхронних електродвигунів потокових технологічних ліній працюють, як правило, на відключення, що приводить до переривання технологічного процесу й, як наслідок, до технологічного збитку;
- практично не передбачається пристроїв, що полегшують аварійний режим роботи асинхронних електродвигунів до завершення технологічного циклу.

1.2 Стан і шляхи вирішення проблеми енергозбереження в електроприводах сільськогосподарських машин

1.2.1 Тенденції розвитку сільськогосподарського електропривода.

Електропривод здійснює кероване електромеханічне перетворення енергії, використовується в усіх галузях сільського господарства, де необхідні рух і механічна робота, споживаючи при цьому більше 65% електроенергії. Якщо інформатика - мозок сучасних технологій, то електроприводи - їх м'язи, засіб практичного розв'язання великої кількості задач. Велика увага приділяється розширенню виробництва регульованих електроприводів змінного струму. За різними джерелами у промислово розвинених країнах від 30% до 60% електроприводів, що випускаються, є регульованими (в Україні до 2%), а на початку XXI століття їх частка зросте до 65-75%. Такі високі темпи зростання виробництва регульованих електроприводів обумовлені їх високою рентабельністю. Використання регульованого

електропривода дозволяє скоротити енергоспоживання: pomp - на 25%-30%, компресорів - на 40%, вентиляторів - на 30%, центрифуг - на 50%. Зважаючи на те, що ці типи механізмів складають більше 50% використовуваних у сільському господарстві приводів, даний напрямок є пріоритетним для економії електроенергії.

Найбільш перспективними зонами впровадження регульованих електроприводів у сільськогосподарському виробництві є системи мікроклімату тваринницьких і птахівничих ферм, установки тепло і холодопостачання, водопостачання, пневмотранспортування, системи стиснутого повітря тощо, а в комунальному господарстві - системи водопостачання, теплопостачання, каналізації, кондиціонування повітря, вентиляції будівель.

Сьогоднішній день регульованого електропривода - це частотно-регульований асинхронний електропривод. Сформована структура такого привода для широкого застосування: мережа - некерований випрямляч - шини постійного струму з конденсаторами - інвертор на транзисторних модулях з широтно-імпульсною модуляцією, керований процесором, - короткозамкнутий двигун. Невелика маса перетворювача частоти (біля 1 кг/кВт), досконала система захисту від перевантажень і аномальних режимів, можливість повного діагностування стану привода, керування від цифрових і аналогових сигналів, просте і зручне програмування роботи, просте з'єднання декількох приводів, які взаємодіють у технологічному процесі - ось неповний перелік корисних якостей, що пов'язані з направленою дією на матерію в інтересах людини. У сільськогосподарському виробництві використовується більше 4 мільйонів електроприводів як регульованих, так і нерегульованих. У сучасному електроприводі асинхронний електродвигун став основним типом електричної машини завдяки простоті, надійності, невисокій вартості; транзисторні модулі визначили вид електричного перетворювача енергії; мікропроцесорні засоби надали електроприводу високу інтелектуальну здатність. Залишилися в минулому через невисоку ефективність електроприводи з багатошвидкісними асинхронними двигунами, двигунами з фазним ротором. Завдяки високій вартості, великим витратам міді, трудомісткості виготовлення суттєво

скоротилось використання електроприводів постійного струму, які протягом тривалого часу не мали конкуренції в класі регульованого привода.

Найбільш масовий асинхронний електропривод у сільському господарстві за кількістю електроенергії, яка споживається, перебуває в діапазоні потужностей 1-10 кВт. За статистичними даними приблизне розподілення асинхронних двигунів за механізмами оцінюється такими показниками: приводи вентиляторів - 37%, транспортерів - 19%, pomp - 17%, оброблювальні станки - 7%, змішувачі - 6%, механізми пересування - 4%, затвори, засувки - 4%, компресори - 3%. Серед виконавчих механізмів за характером навантаження найбільш розповсюдженими є вентилятори і помпи, які складають більше половини загальної кількості механізмів. Способи регулювання продуктивності, найпоширеніші в Україні, засновані на дроселюванні потоків і супроводжуються значними втратами енергії і зменшенням коефіцієнта корисної дії.

У той же час у США, Західній Європі, Японії управління режимами роботи сучасних механізмів здійснюється за рахунок зміни швидкості обертання асинхронних двигунів, які живляться від перетворювачів частоти. Використання регульованого асинхронного електропривода дозволяє зменшити витрати електроенергії на 20-50%.

У класі нерегульованого електропривода короткозамкнений асинхронний двигун з найпростішими засобами керування був, є і залишиться єдиним масовим типом електропривода, попри те, що і тут з'являються нові рішення.

Так, закордонні спеціалісти серйозно займаються проблемою створення енергозберігаючих двигунів, коефіцієнт корисної дії і коефіцієнт потужності яких підвищуються за рахунок збільшення маси активних матеріалів і підвищення їх якості. Ефект тут можливий лише за умови тривалої роботи привода з такими двигунами в умовах постійного навантаження. Якщо ж навантаження помітно змінюється протягом робочого циклу або, за умовами технології, кількість робочих годин протягом року невелика, додаткові витрати на установку таких двигунів стають недоцільними.

Набагато плідніші зусилля спеціалістів, направлені на раціональний вибір привода для конкретних умов технології. Як показує досвід, чимала кількість нерегульованих електроприводів має завищену потужність двигунів (коефіцієнт використання 0,3-0,4), тобто використовуються неефективно. Тут стануть у нагоді прикладні комп'ютерні програми, що дозволяють уникнути помилок при виборі двигунів.

З нових апаратних засобів, які використовуються для вдосконалення нерегульованого асинхронного електропривода, необхідно відзначити «м'які пускачі» - прості тиристорні пристрої, що дозволяють регулювати напругу на затискачах двигуна, і, відповідно, контролювати пуск і зупинку привода, а також забезпечити енергозбереження шляхом зменшення напруги на недовантаженому двигуні.

Цікава і дуже важлива особливість сучасного етапу розвитку електропривода - перехід від нерегульованого електропривода до регульованого в технологічних установках, в яких до сьогодні домінував простий нерегульований електропривод. Це, у першу чергу, приводи pomp і вентиляційних систем водо- і тепlopостачання будівель. Досвід використання електронних перетворювачів частоти в подібних агрегатах, які працюють цілодобово і споживають велику кількість енергії, показав, наскільки великі тут резерви енерго- і ресурсозбереження і як ефективно і просто вони можуть бути реалізовані. Економія при цьому в таких системах сягає 50-60% електроенергії, води - 25%, теплової енергії - 10%.

У майбутньому нерегульований (за швидкістю) електропривод залишиться переважаючим типом привода. Не зміниться і принципове технічне рішення - у його основі буде, як і в минулому, асинхронний електродвигун. Водночас необхідність вирішення проблеми енергозбереження примусить розробників уважно ставитися до вибору потужності двигуна. Застосовуватимуться ефективні і доступні прийоми енергоаудиту, що базуються на широкому і цілеспрямованому використанні комп'ютерних засобів. Значно більша, ніж сьогодні, кількість потужних асинхронних електроприводів буде оснащуватися плавними пускачами, які виконуватимуть також функції енергозбереження при недовантаженому двигуні, захисті від перенапруг, симетрії фаз тощо.

Найближче майбутнє електропривода - це його «інтелектуалізація». Цей природний і неминучий процес, який відкриває все нові можливості, створює і нові проблеми. Поміж них: адаптація нових принципів і алгоритмів керування до задач електропривода з новими апаратними можливостями; розробка засобів адекватного описування енергетичних процесів у складних електромеханічних системах; створення ефективних і зручних для керування моделей *двигун - технологічний агрегат*; електромагнітна сумісність привода і мережі, перетворювача і двигуна при високочастотній широтно-імпульсній модуляції; ефективний енергоаудит; пакети прикладних комп'ютерних програм, за допомогою яких визначається раціональне технічне рішення.

1.2.2 Визначення потужності електродвигунів.

При типових графіках навантаження потужність електродвигуна для привода робочих машин визначається за відомими формулами електропривода. За умов тривалих різномірних або випадкових навантажень ці формули дають велику похибку при визначенні еквівалентного значення струму або потужності. У [145] - запропонований метод оцінки потужності, який найбільш адекватно відтворює процес нагрівання електродвигуна при таких режимах роботи. Для визначення еквівалентного струму за цим методом необхідно зняти графік зміни струму в часі. Опрацювавши цей графік на персональному комп'ютері, отримують спектральні щільності випадкового процесу навантаження.

Потужність електродвигуна потрібно вибирати також із врахуванням відхилення температури навколишнього середовища від 40°C:

$$P_{\theta} = K_{\theta} P_n,$$

$$K_{\theta} = \sqrt{1 \pm \Delta t + \left(a + \frac{1}{\theta} \right)},$$

де P_{θ} – шукана потужність, кВт;

P_n – номінальна потужність електродвигуна при 40°C, кВт;

Δt – різниця стандартної і фактичної температур, °C;

θ – граничне перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища за нормами для ізоляції відповідного класу (А - 70°C, Е - 85°C). Для електродвигунів другої єдиної серії θ становить: 75°C - для 6-9 габаритів захищеного виконання і 1-5 габаритів закритого обдувного; 90°C - для 6-9 габаритів закритого обдувного виконання; a – відношення постійних втрат (у сталі і механічних) до змінних (в обмотках) при номінальному навантаженні.

1.2.3 Обмеження холостого ходу електропривода, заміна недовантажених електродвигунів.

Якщо середнє завантаження електродвигуна становить 45% і нижче, то заміна його на двигун меншої потужності завжди доцільна. При завантаженні, більшому від 70%, його заміна недоцільна.

Якщо завантаження електродвигуна коливається у межах 45-70%, доцільність його заміни слід обґрунтувати розрахунками. При заміні електродвигуна зменшуються втрати електроенергії як у самому двигуні, так і в електричній мережі, які обчислюють за формулою:

$$\Delta p_{\text{сум}} = [Q_x (1 - K_n^2) + K_n Q_n] K_e + \Delta p_0 + K_n^2 \Delta p_{a.n},$$

де Q_x Q_n – реактивні потужності електродвигуна при роботі відповідно у режимі холостого ходу і номінальному, кВА;

K_e – коефіцієнт втрат електроенергії;

Δp_0 і $\Delta p_{a.n}$ – приріст втрат активної потужності при роботі електродвигуна відповідно без навантаження і з навантаженням 100%, кВт;

$Q_x = \sqrt{3} U_i I_i \sin \varphi_0$, де U_i – номінальна напруга, В; I_i – сила струму при роботі електродвигуна в режимі холостого ходу, А;

$$\Delta p_0 = P_n \frac{1 - \eta_0}{\eta_0} \frac{\gamma}{1 + \gamma},$$

$$\Delta p_{a.n} = P_n \frac{1 - \eta_0}{\eta_0} \frac{1}{1 + \gamma},$$

де γ – розрахунковий коефіцієнт, що залежить від конструкції електродвигуна

$$\gamma = \frac{\Delta p_0(\%)}{[1 - \eta_n(\%)] - \Delta p_0(\%)},$$

де $\Delta p_0(\%)$ — втрати холостого ходу, віднесені до номінальної потужності електродвигуна у відсотках.

Застосування обмежувачів холостого ходу на робочих машинах, які мають міжопераційний час (час холостого ходу) 10 с і більше, сприяє значній економії електроенергії.

1.2.4 Оптимізація режимів роботи електропривода при змінних навантаженнях.

Збільшення середнього навантаження робочих машин приводить до збільшення навантаження електродвигунів, що у свою чергу збільшує коефіцієнт корисної дії електродвигуна, робочої машини і всього електропривода.

Вихідними даними для визначення економії електроенергії при збільшенні навантаження робочих машин є питомі витрати електроенергії для робочої машини. Це кількість електроенергії, яку споживав електродвигун із мережі, віднесена до кіловат-години корисної роботи при даному технічному режимі:

$$E_i = P_i \cdot T_i,$$

де P_m — корисна потужність машини, кВт;

T_m — тривалість корисної роботи, год.

Питомі витрати електроенергії визначають за формулою:

$$\Delta E = \frac{1}{\eta_{n,m} K_n} \left(K_n + \frac{\alpha(1 - \eta_{n,m})}{K_m} \right),$$

де $\eta_{i,i}$ — коефіцієнт корисної дії робочої машини при повному навантаженні;

K_n — коефіцієнт навантаження;

K_m — коефіцієнт використання робочої машини;

α — коефіцієнт, що залежить від типу та конструкції робочої машини і перебуває в межах від 0,7 до 0,9.

Коефіцієнт навантаження розраховують за формулою:

$$K_n = P_m / P_n,$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна, кВт.

Коефіцієнт використання робочої машини становить:

$$K_m = T_m / (T_m + T_x),$$

де T_m , T_x — тривалість періодів відповідно холостого ходу і робочого періоду машини, год.

При максимальному використанні робочої машини ($K_m = 1$) питомі витрати енергії дорівнюють:

$$\Delta E' = [K_n + \alpha(1 - \eta_{m,n})] / (\eta_{m,n} K_n),$$

Якщо $K_m = 1$ і машина повністю завантажена ($K_n = 1$), питомі витрати енергії будуть мінімальними:

$$\Delta E_0 = [1 + \alpha(1 - \eta_{m,n}) / \eta_{m,n}],$$

Відношення

$$\frac{\Delta E}{\Delta E_0} = \frac{K_n K_m + \alpha(1 - \eta_{m,n})}{[1 + \alpha(1 - \eta_{m,n}) / \eta_{m,n}] K_n K_m}.$$

визначає коефіцієнт збільшення питомих витрат енергії (β) залежно від навантаження і тривалості роботи у режимі холостого ходу.

Існують приводні системи, в яких двигун працює в умовах постійного навантаження або зміна останнього коливається у вузькому діапазоні поблизу номінального значення. У цьому випадку доцільне використання двигунів з підвищеним коефіцієнтом корисної дії, які називаються енергозберігаючими. Однак ціна і вага цих двигунів вище звичайних [146].

В умовах змінного в широкому інтервалі навантаження використання таких електродвигунів недоцільне, а доцільне застосування електродвигунів загального призначення з удосконаленими режимами роботи.

У цьому випадку в сільському господарстві застосовують електроприводи, які працюють в умовах недовантаження, з регуляторами напруги.

У таких електроприводах забезпечується зменшення витрат активної і реактивної потужності і, як наслідок, економія електроенергії.

Зменшення напруги на затискачах електродвигуна може здійснюватися такими способами:

- перемикання схеми з'єднання обмотки статора із трикутника на зірку;
- секціювання статорних обмоток;
- зниження напруги у силових електромережах сільськогосподарських підприємств перемиканням відгалужень знижувальних трансформаторів.

Перемикання схеми з'єднання обмотки статора асинхронного електродвигуна із трикутника на зірку рекомендується для електродвигунів із напругою до 1000 В, що постійно завантажені на 35-40% і нижче. При такому перемиканні у три рази зменшується максимальний обертальний момент, тому необхідно перевірити граничний коефіцієнт завантаження електродвигуна, який визначають за формулою:

$$\lambda_{н.зр} = \lambda_m / 4,5.$$

де λ_m - кратність максимального обертального моменту відносно номінального (наводиться в каталогах).

Секціювання статорних обмоток асинхронних двигунів роблять, якщо неможливо здійснити перемикання схеми з'єднання обмотки статора із трикутника на зірку. В електродвигунів з паралельними витками в обмотці статора секціювання здійснюють перепаяванням лобових з'єднань обмотки. Більш складно перемкнути обмотку двигуна на іншу схему з'єднання, якщо вона виконана одним проводом. У таких випадках перемикання секцій обмотки можливе тільки при капітальних ремонтах двигунів.

Перемикання відгалужень знижувального трансформатора виконують у тих випадках, коли він одночасно не живить інші електроприймачі, на затискачах яких знижувати напругу не можна.

Застосування електродвигунів загального призначення в приводних системах з динамічним навантаженням викликає несприятливу зміну енергетичних показників.

У таких випадках зменшення енерговитрат на одиницю виробленої продукції можливе при застосуванні замкнених систем регулювання завантаження електропривода за величиною струму навантаження або ковзання електродвигуна. Практика використання таких систем у сільському господарстві показує [147, 148, 149], що енергоємність процесів подрібнення кормів, приготування паст, дозування грубих кормів зменшується на 12-20%.

Особливим класом машин, які широко використовуються в сільському господарстві, є відцентрові машини-помпи і вентилятори потужністю 0,5-50 кВт. До цього класу належать помпи холодного і гарячого водопостачання з продуктивністю 12,5-100 м³/год і напором 20-80 м водяного стовпа, вентилятори загального застосування з витратами до 50000 м³/год і тиском до 2000 кПа (діаметр робочого колеса від 200 до 1000 мм).

Оскільки режим роботи визначається точкою перетину характеристик помпи (вентилятора) і магістралі, то регулювання швидкості відкриває широкі можливості керування режимами за доцільним законом або алгоритмом - будь-яка точка в діапазоні $H-Q$ стає доступною при регулюванні кутової швидкості. Так, наприклад, якщо у випадку нерегульованого привода єдиною можливістю зменшення витрат у два рази від номінальної їх величини є збільшення опору магістралі, тобто перехід від характеристики 1 до характеристики 2 (дроселювання), при цьому надлишок напору $\Delta H = 0,75$, то при регульованому приводі режим $Q = 0,5$ досягається завданням кутової швидкості $\omega = 0,5$ без будь-якого надлишку напору [150].

В асинхронних електродвигунах pomp і вентиляторів регулювання кутової швидкості можливе при вмиканні між електричною мережею і двигуном додаткового електричного перетворювача, який змінює амплітуду (перетворювач напруги - ТН), або амплітуду і частоту (перетворювач частоти - ПЧ) прикладеної до двигуна напруги.

Характеристики цих перетворювачів і сумісна їх робота з електродвигунами детально висвітлені в літературі [151], тому розглянемо ці способи регульованого електропривода у зіставленні відносно відцентрових машин.

1.2.5 Заходи економії електроенергії в системах виробництва стиснутого повітря і холоду.

Виробництво стиснутого повітря - вкрай неефективний в енергетичному аспекті процес. Біля 90% електроенергії, яка витрачається для виробництва стиснутого повітря, втрачається у вигляді тепла. Недосконала конструкція і витоки повітря з розподільчих трубопроводів сприяють подальшому зменшенню ефективності ще на 30-50%. Звичайно використовуються поршневі компресори, їх продуктивність контролюється за допомогою підпружиненого запобіжного клапана. У цих компресорах споживання електроенергії не змінюється навіть тоді, коли зникає необхідність у подачі стиснутого повітря. В останньому випадку клапан просто стравлює повітря в атмосферу.

Напрямки економії електроенергії:

- ліквідація витоків повітря у трубопроводах;
- зменшення навантаження шляхом відключення пневмоінструменту, що не використовується;
- регулярне очищення фільтру всмоктування (падіння тиску на 25 МБар з причини засміченості фільтру зменшує ефективність роботи компресора на 2%);
- розділення пневмомережі на секції, вимикання непрацюючих секцій за допомогою вентилів;
- заміна пневмоінструменту на електроінструмент;
- використання системи відбору теплоти для охолодження потужних компресорів і залучення її з метою опалення, нагрівання води;
- попередження збільшення тиску в системі вище 5 Бар. Зменшення тиску на 1 Бар дозволяє знизити витрати електроенергії на 5-10%;
- автоматичне вимикання компресора при нульовому навантаженні;
- зменшення температури повітря, що всмоктується;
- застосування компресорів сучасного типу, що споживають на холостому ході 30% номінальної потужності.

Напрямки економії енергії в холодильних установках:

- уникнення навантаження, яке створюється за рахунок охолодження або переохолодження без технологічної необхідності;
- зменшення холодильного навантаження шляхом покращення термоізоляції холодильних камер;
- підвищення рівня температури на холодній стороні і зменшення рівня температури на гарячій стороні;
- покращення розморожувальних систем; ефективність обмерзлого випарувача вкрай низька;
- уникати відкритих дверей, а також інших витоків в холодильних камерах;
- продуктивність холодильних машин повинна мати автоматичне керування, особливо при змінному навантаженні;
- зменшення кількості теплоти, що віддається в холодильній камері - помпами, освітленням;
- уникнення роботи компресорів у напівнавантаженому стані, особливо це стосується гвинтових компресорів.

РОЗДІЛ 2.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІ.

2.1 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції потужності на валу.

Розглянемо механічні характеристики електродвигуна (крива 1) і робочої машини (криві 2 і 2'), які наведені на рис. 2.1.

На рис. 2.1 наведені втрати активної потужності в робочій машині на тертя (перша заштрихована площа):

$$P_o = M_o \cdot \omega_n. \quad (2.1)$$

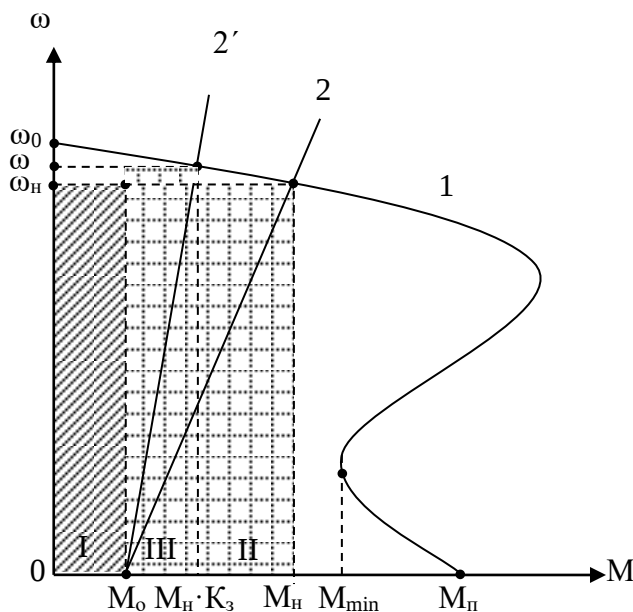


Рис. 2.1. Механічні характеристики: електродвигуна (крива 1), робочої машини (крива 2 і 2') при номінальному і неповному навантаженні.

Активна потужність, яку споживає робоча машина на виконання корисної роботи при номінальному навантаженні, наведена другою заштрихованою площею:

$$P_n = (M_n - M_o) \cdot \omega_n, \quad (2.2)$$

Активна потужність, яку споживає робоча машина на виконання корисної роботи при неповному навантаженні, наведена третьою заштрихованою площею:

$$P = (M_n \cdot \kappa_{з.м} - M_o) \cdot \omega, \quad (2.3)$$

де $\kappa_{з.м.}$ – коефіцієнт завантаження робочої машини;

ω – кутова швидкість робочої машини при неповному завантаженні, рад/с.

Коефіцієнт завантаження робочої машини представляє собою відношення фактичної продуктивності до номінальної:

$$\kappa_{з.м.} = Q/Q_n, \quad (2.4)$$

де Q – фактична продуктивність робочої машини;

Q_n – номінальна продуктивність робочої машини.

Таким чином, в загальному випадку потужність, яку споживає робоча машина, дорівнює:

$$P_c = P_o + P, \quad (2.5)$$

Отримано вираз коефіцієнта завантаження електродвигуна:

$$\kappa_z = \frac{P_o + P}{P_{2н}}. \quad (2.6)$$

де $P_{2н}$ – номінальна активна потужність електродвигуна, Вт.

Як відомо, в асинхронному електродвигуні з короткозамкненим ротором, як перетворювачі електричної енергії в механічну, спостерігаються наступні фізичні явища, що приводять до втрати активної потужності в окремих елементах його конструкції:

- явище теплової дії електричного струму, що протікає по обмотках статора;
- явище теплової дії електричного струму, що протікає по короткозамкненій обмотці ротора;
- явище теплової дії вихрових струмів, що протікають у магнітопроводі електродвигуна;
- явище перемагнічування (гістерезису) магнітопровода електродвигуна;
- явище тертя в механічній системі електродвигуна (у підшипниках, повітря об ротор);
- інші явища, що приводять до додаткових втрат активної потужності.

Всі зазначені фізичні явища, за винятком явища вихрових струмів і перемагнічування, що приводять до втрати активної потужності, ураховуються Г-

образною схемою заміщення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором [1], наведеною на рис. 2.2.

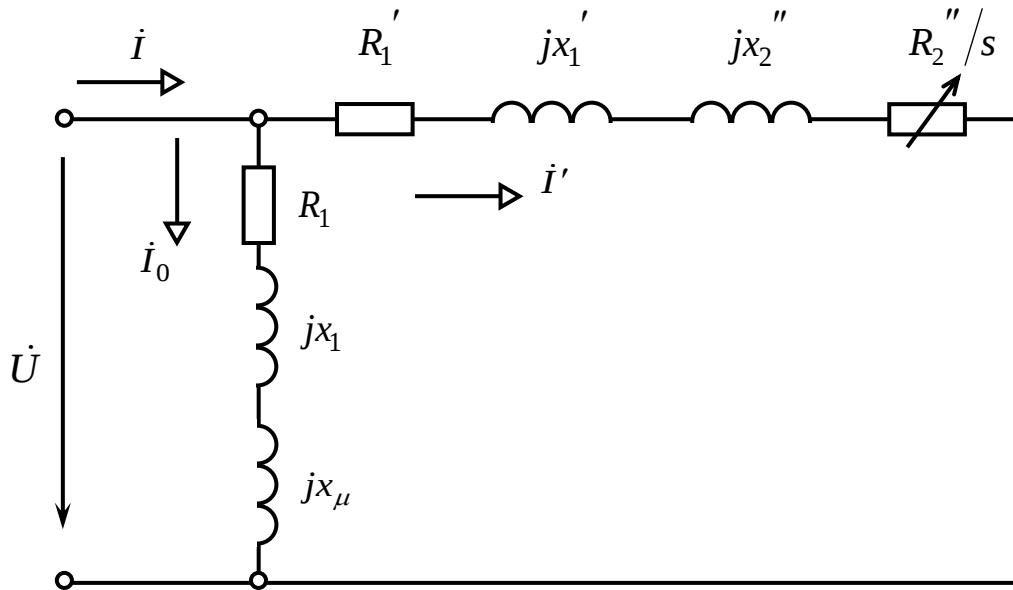


Рис. 2.2. Схема заміщення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором (для однієї фази).

Активна потужність, яку споживає асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, перетворюється в механічну $P_{\text{мх}}$, що складається з механічної потужності P_2 , яка передається через вал робочій машині, механічної потужності P_m , яка передається в механічну систему електродвигуна, і механічної потужності P_δ , що враховує додаткові втрати в електродвигуні, тобто

$$P_{\text{мх}} = P_2 + P_m + P_\delta, \quad (2.7)$$

Механічна потужність $P_{\text{мх}}$ може бути визначена в такий спосіб [2]:

$$P_{\text{мх}} = 3R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (2.8)$$

де R_2'' - приведений активний опір фази ротора, Ом;

I' - діюче значення сили електричного струму в колі схеми заміщення однієї фази електродвигуна, А;

s - відносне ковзання обертового магнітного поля електродвигуна.

Механічна потужність P_2 , яка передається робочій машині, залежить від моменту опору робочої машини M_c й кутової швидкості обертання її вала ω , тобто

$$P_2 = M_c \cdot \omega, \quad (2.9)$$

Механічна потужність P_m , яка передається в механічну систему електродвигуна, залежить від моменту тертя механічної системи електродвигуна M_m й кутової швидкості обертання її вала ω , тобто

$$P_m = M_m \cdot \omega, \quad (2.10)$$

Додаткові втрати активної потужності в електродвигуні можуть бути знайдені в такий спосіб:

$$P_o = P_{mx} - P_2 - P_m, \quad (2.11)$$

Інші сумарні втрати активної потужності P_Σ можуть бути знайдені, використовуючи схему заміщення асинхронного електродвигуна:

$$P_\Sigma = 3(R_1' + R_2'')I'^2 + 3R_1I_0^2, \quad (2.12)$$

де R_1', R_2'', R_1 , - параметри схеми заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна, Ом;

I, I_0, I' - діючі значення сил електричних струмів гілок схеми заміщення однієї фази електродвигуна, А.

Перевіримо справедливність викладеного вище на прикладі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором типорозміру 4A100S2Y3 з наступними каталожними даними:

$$\begin{aligned} P_{2H} &= 4 \text{ кВт}; & \eta_H &= 0,865; & \cos \varphi_H &= 0,89; & R_1' &= 1,509 \text{ Ом}; \\ x_1' &= 1,537 \text{ Ом}; & R_2'' &= 1,006 \text{ Ом}; & x_2'' &= 2,767 \text{ Ом}; & R_1 &= 1,485 \text{ Ом}; \\ x_1 &= 1,513 \text{ Ом}; & x_\mu &= 95 \text{ Ом}; & U_H &= 220 \text{ В}; & s_H &= 0,033; \\ s_K &= 0,28; & s_M &= 0,8; & m_K &= 2,5; & m_M &= 1,6. \end{aligned}$$

Аналіз проведемо для номінального режиму.

Визначаємо механічну потужність електродвигуна в номінальному режимі $P_{мхн}$ в такий спосіб:

$$P_{\text{мхн}} = 3R_2'' \frac{1-s_n}{s_n} I_n'^2, \quad (2.13)$$

де s_n - номінальне ковзання магнітного поля електродвигуна щодо його ротора;

I_n' - номінальна сила електричного струму в гілці схеми заміщення асинхронного електродвигуна, А.

Останню знаходимо, користуючись схемою заміщення асинхронного електродвигуна:

$$I_n' = \frac{U_n}{\sqrt{\left(R_1' + R_2''/s_n\right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2}}, \quad (2.14)$$

де U_n - номінальна фазна напруга електродвигуна, В.

Підставивши в (2.13) і (2.14) значення параметрів і фізичних величин, знаходимо:

$$P_{\text{мхн}} = 4112 \text{ Вт},$$

Знаходимо сумарні втрати активної потужності в механічній системі електродвигуна P_m й додаткові P_δ :

$$P_m + P_\delta = P_{\text{мхн}} - P_{2n}, \quad (2.15)$$

де P_{2n} - номінальна активна потужність, яка передається робочій машині з вала електродвигуна, Вт.

Підставивши значення потужностей, одержимо:

$$P_m + P_\delta = 4112 - 4000 = 112 \text{ Вт},$$

Знаходимо інші сумарні втрати активної потужності:

$$P_{\Sigma n} = 3\left(R_1' + R_2''\right)I_n'^2 + 3R_1 I_0'^2, \quad (2.16)$$

$$\text{де } I_0' = \frac{U_n}{\sqrt{R_1'^2 + \left(x_1' + x_\mu\right)^2}}, \quad (2.17)$$

Підставивши значення параметрів і фізичних величин в (2.16) і (2.17), одержимо:

$$P_{\Sigma n} = 3(1,529 + 1,006)6,815^2 + 3 \cdot 1,485 \cdot 2,28^2 = 350 + 23 = 373 \text{ Вт},$$

Загальні сумарні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при номінальному режимі роботи

$$\Delta P'_n = P_{\Sigma n} + P_m + P_\delta, \quad (2.18)$$

Підставивши значення потужностей, одержимо:

$$\Delta P'_n = 373 + 112 = 485 \text{ Вт},$$

Визначимо ці втрати за каталожним даними:

$$\Delta P_n = \frac{P_{2n}}{\eta_n} - P_{2n}, \quad (2.19)$$

Підставивши значення потужності й к.к.д., одержимо

$$\Delta P_n = \frac{4000}{0,865} - 4000 = 624 \text{ Вт},$$

Як бачимо, використовуючи каталожні дані, отримуємо втрати активної потужності в електродвигуні, значення яких перевищує отримані втрати розрахунковим шляхом. Це пов'язане з тим, що Г-образна схема заміщення не враховує втрати в магнітопроводі. Тому знаходимо втрати в магнітопроводі на гістерезис і вихрові струми як різницю значень втрат активної потужності, отриманих за каталожним даними й розрахованих за параметрами схеми заміщення

$$P_m = \Delta P_n - \Delta P'_n = 624 - 485 = 139 \text{ Вт}, \quad (2.20)$$

Визначаємо постійні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при номінальному режимі роботи:

$$\Delta P_{const_n} = P_m + P_m + P_\delta + 3R_1 I_0^2, \quad (2.21)$$

$$\Delta P_{const_n} = 139 + 112 + 23 = 274 \text{ Вт},$$

Визначаємо змінні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при номінальному режимі роботи:

$$\Delta P_{var_n} = P_{\Sigma n} - 3R_1 I_0^2, \quad (2.22)$$

$$\Delta P_{var_n} = 373 - 23 = 350 \text{ Вт},$$

Визначаємо коефіцієнт втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні як відношення постійних втрат до змінних втрат у номінальному режимі роботи

$$a = \frac{\Delta P_{const_n}}{\Delta P_{var_n}} = \frac{274}{350} = 0,78 \quad (2.23)$$

На підставі викладеного приймаємо наступну методику аналітичного дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні з короткозамкненим ротором у функції активної потужності, яка передається з вала електродвигуна робочій машині, тобто $\Delta P = f(P_2)$:

1) задаємося значеннями ковзання магнітного поля щодо ротора s в межах від нуля до критичного значення s_k , у тому числі номінальним ковзанням;

2) визначаємо квадрат сили електричного струму гілки розрахункової схеми, у тому числі при номінальному ковзанні

$$I'^2 = \frac{U_n^2}{\left(R_1' + R_2''/s\right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2}, \quad (2.24)$$

3) визначаємо механічну потужність, у тому числі при номінальному струмі

$$P_{mx} = 3 \cdot R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (2.25)$$

4) визначаємо втрати активної потужності в механічній системі електродвигуна й додаткові

$$P_m + P_o = P_{mx} - P_{2H}, \quad (2.26)$$

5) визначаємо втрати активної потужності від намагнічувального струму

$$P_0 = 3R_1 I_0^2, \quad (2.27)$$

$$I_0^2 = \frac{U_n^2}{R_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}, \quad (2.28)$$

6) визначаємо втрати активної потужності в основній гілці розрахункової схеми, у тому числі $P_{\Sigma H}$

$$P_\Sigma = 3 \left(R_1' + R_2'' \right) I'^2, \quad (2.29)$$

7) визначаємо втрати активної потужності в електродвигуні при номінальному режимі роботи без обліку втрат у магнітопроводі

$$\Delta P'_n = P_m + P_\phi + P_0 + P_{\Sigma n}, \quad (2.30)$$

8) визначаємо втрати активної потужності в електродвигуні при номінальному режимі роботи з каталожних даних

$$\Delta P_n = \frac{P_{2n}}{\eta_n} - P_{2n}, \quad (2.31)$$

9) визначаємо втрати в магнітопроводі

$$P_m = \Delta P_n - \Delta P'_n, \quad (2.32)$$

10) визначаємо сумарні втрати активної потужності в електродвигуні

$$\Delta P = P_m + P_\phi + P_0 + P_{\Sigma} + P_m, \quad (2.33)$$

11) визначаємо механічну потужність, яка передається на вал робочої машини

$$P_2 = P_{mx} - P_m - P_\phi. \quad (2.34)$$

Досліджуємо втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні з урахуванням росту активного опору обмотки при нагріванні.

Рівняння теплового балансу асинхронного електродвигуна, розглядаючи останній як гомогенне тіло, має такий вигляд:

$$Cd\tau + L\pi dt = \Delta P dt, \quad (2.35)$$

де C - теплоємність двигуна, $\frac{Дж}{^\circ C}$;

τ - перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища, $^\circ C$;

L - тепловіддача електродвигуна в навколишнє середовище, $\frac{Дж}{с \cdot ^\circ C}$;

ΔP - втрати активної потужності в електродвигуні, Вт;

t - поточний час, с.

Перепишемо рівняння (2.35) в іншому вигляді:

$$\frac{C}{L} \frac{d\tau}{dt} + \tau = \frac{\Delta P}{L}, \quad (2.36)$$

У сталому режимі рівняння (2.36) приймає вигляд:

$$\tau_y = \frac{\Delta P_y}{L}, \quad (2.37)$$

де τ_y - стале перевищення температури обмотки, °С;

ΔP_y - втрати активної потужності в електродвигуні в сталому режимі, Вт;

Останні запишуться в такий спосіб:

$$\Delta P_y = \Delta P_{с.н} + \kappa^2 \Delta P_{м.н} (1 + \alpha(\tau_y + \vartheta_{cp} - 75)), \quad (2.38)$$

Підставляємо (2.38) в (2.37) і одержуємо:

$$\tau_y = \frac{\Delta P_{с.н} + \kappa^2 \Delta P_{м.н} (1 + \alpha(\tau_y + \vartheta_{cp} - 75))}{L}, \quad (2.39)$$

Перетворимо (2.39) і одержимо:

$$\tau_y = \frac{\Delta P_{с.н} + \kappa^2 \Delta P_{м.н} (1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 75))}{L - \alpha \kappa^2 \Delta P_{м.н}}, \quad (2.40)$$

Вираз (2.40) у номінальному режимі приймає вигляд:

$$\tau_n = \frac{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{м.н} (1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 75))}{L - \alpha \Delta P_{м.н}}, \quad (2.41)$$

звідки

$$L = \frac{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{м.н} (1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 75)) + \alpha \tau_n \Delta P_{м.н}}{\tau_n}, \quad (2.42)$$

Підставляємо (2.42) в (2.41) і одержуємо

$$\tau_y = \tau_n \frac{\Delta P_{с.н} + \kappa^2 \Delta P_{м.н} (1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 75))}{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{м.н} (1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 75)) - \alpha \tau_n \kappa^2 \Delta P_{м.н} (\kappa^2 - 1)}, \quad (2.43)$$

Рівняння (2.43) в іншому вигляді запишеться в такий спосіб:

$$\tau_y = \tau_n \frac{a + \kappa^2 (1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 75))}{a + 1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 75) - \alpha \tau_n (\kappa^2 - 1)}, \quad (2.44)$$

Втрати активної потужності в обмотках електродвигуна

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma_n} (1 + \alpha(\tau_y + \vartheta_{cp} - 75)) \kappa^2, \quad (2.45)$$

Проведемо розрахунок втрат для електродвигуна 4A100S2У3, результати занесемо в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

s	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,055	0,06
I'^2, A^2	1,18	4,62	10,25	17,9	27,5	38,9	52,04	66,7	82,4	99,6	118,05	137,6
κ^2	0,025	0,1	0,22	0,38	0,59	0,83	1,12	1,43	1,77	2,14	2,54	2,96
$P_{\text{мх}}, Bm$	708	1380	2031	2647	3236	3795	4330	4831	5277	5711	6121	6506
$P_m + P_{\partial}, Bm$	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112
P_0, Bm	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
P_{Σ}, Bm	9	38	85	152	245	363	521	672	969	1302	1739	2362
$\tau_y, ^\circ C$	36	39	45	53	64	78	97	100	152	193	244	317
$P_{\text{м}}, Bm$	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
$\Delta P, Bm$	283	312	359	426	519	637	791	950	1243	1576	2013	2636
P_2, Bm	596	1268	1919	2535	3124	3683	4218	4713	5165	5599	6009	6394
$\frac{\Delta P}{P_2}$	0,47	0,25	0,19	0,17	0,16	0,17	0,18	0,2	0,26	0,28	0,32	0,41

Уведемо нове поняття - коефіцієнт втрат

$$\kappa_{\theta} = \frac{\Delta P}{P_2} \quad (2.46)$$

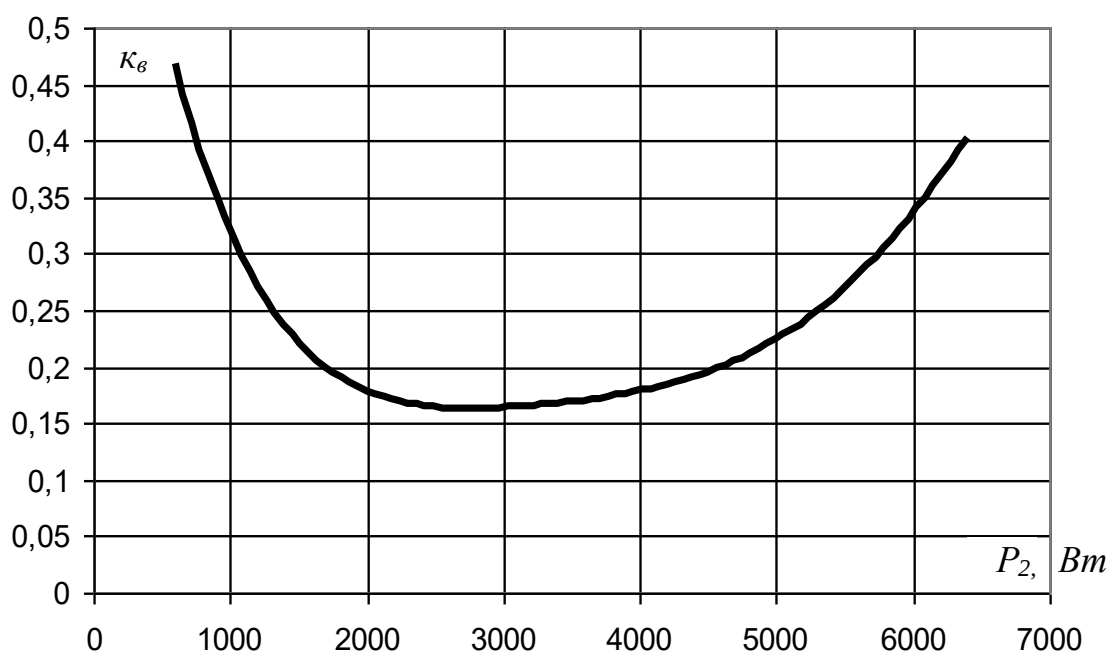


Рис. 2.3. Залежність коефіцієнта втрат в асинхронному електродвигуні в функції потужності на валу.

2.2 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції ковзання електродвигуна.

Досліджуємо змінні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції ковзання.

Представимо Г-образну схему заміщення асинхронного електродвигуна (для однієї фази) в уточненому вигляді (рис. 2.4)

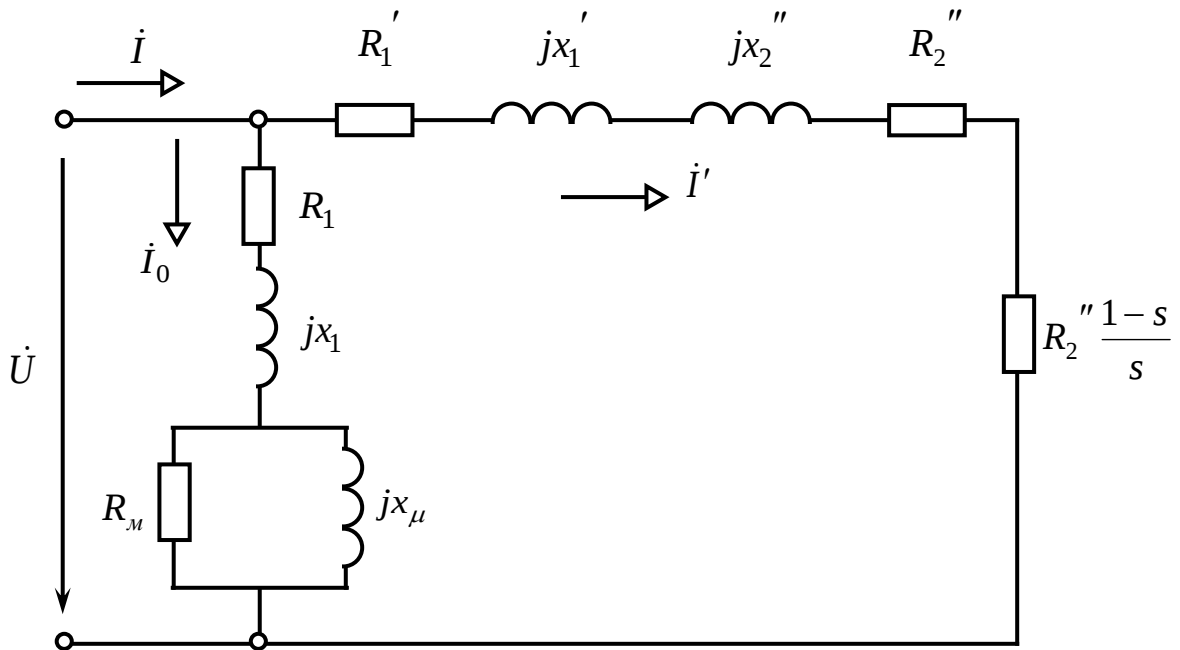


Рис. 2.4 Уточнена схема заміщення асинхронного електродвигуна (для однієї фази).

На наведеній схемі:

R_m – активний опір, який еквівалентний втратам активної потужності в магнітопроводі (від вихрових струмів і на перемагнічування), Ом;

$R_2'' \frac{1-s}{s}$ – активний опір, який еквівалентний активній потужності, яка передається на вал, Ом.

Для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 втрати в магнітопроводі становлять 139 Вт, активний опір, який еквівалентний цим втратам, дорівнює 348,2 Ом.

Запишемо комплекс діючого значення сили струму I_0 намагнічуючого контуру:

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}}{R_1 + jX_1 + \frac{R_m \cdot jX_\mu}{R_m + jX_\mu}} = I_0 e^{-j\varphi_0}, \quad (2.47)$$

Комплекс повної потужності в намагнічуючому контурі, прийнявши $\psi_u = 0$

$$\tilde{S}_0 = \dot{U} \dot{I}_0^* = UI_0 e^{j\varphi_0} = S_0 e^{j\varphi_0}, \quad (2.48)$$

Побудуємо комплекс повної потужності на комплексній площині (рис. 2.5).

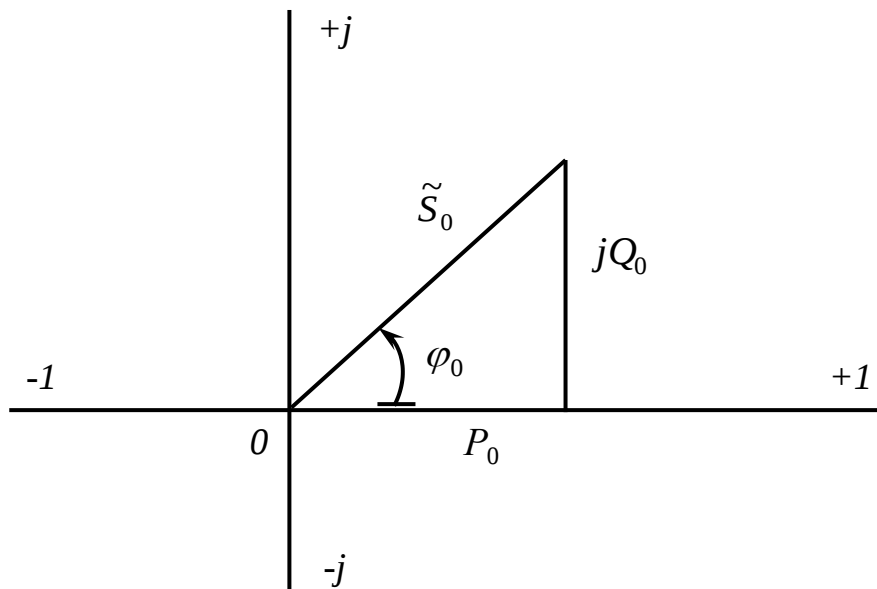


Рис. 2.5. Комплекс повної потужності на комплексній площині

Проекція комплексу повної потужності на вісь позитивних значень являє собою втрати активної потужності в намагнічуючому контурі:

$$P_0 = S_0 \cos \varphi_0, \quad (2.49)$$

Якщо експериментально виміряти діюче значення сили електричного струму холостого ходу $I_{x.x}$ й коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{x.x}$, то можна більш точно розрахувати постійні втрати активної потужності при номінальному режимі ($U = U_n$) з урахуванням додаткових втрат і втрат у механічній системі двигуна

$$\Delta P_{c.n} = 3U_n \cdot I_{x.x} \cdot \cos \varphi_{x.x}, \quad (2.50)$$

Запишемо комплекс діючого значення сили електричного струму в іншій вітці схеми заміщення:

$$\dot{I}' = \frac{\dot{U}}{R_1' + R_2'' + j(x_1' + x_2'') + R_2'' \frac{1-s}{s}}, \quad (2.51)$$

Уведемо позначення:

$$Z = R_1' + R_2'' + j(x_1' + x_2''), \quad (2.52)$$

Тоді

$$\dot{I}' = \frac{\dot{U}}{Z + R_2'' \frac{1-s}{s}}, \quad (2.53)$$

Перетворимо (2.53):

$$\dot{I}' = \frac{\frac{\dot{U}}{Z}}{1 + \frac{R_2'' \frac{1-s}{s}}{Z}} = \frac{\dot{I}_\kappa'}{1 + \frac{R_2'' \frac{1-s}{s}}{z} e^{j\psi}}, \quad (2.54)$$

$$\text{де } \dot{I}_\kappa' = \frac{\dot{U}}{Z}, \quad (2.55)$$

$$Z = ze^{j\phi'}, \quad (2.56)$$

$$\phi' = \operatorname{arccctg} \frac{R_1' + R_2''}{x_1' + x_2''}, \quad (2.57)$$

$$z = \sqrt{\left(R_1' + R_2''\right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2}, \quad (2.58)$$

$$\psi = -\phi', \quad (2.59)$$

$$\dot{U} = Ue^{j\psi_u}, \quad (2.60)$$

Рівняння (2.54) являє собою рівняння кругової діаграми струму $\dot{I}'$.

Побудуємо кругову діаграму струму $\dot{I}'$, прийнявши $\psi_u = 0$ (рис. 2.6)

Запишемо комплекс діючого значення напруги, прийнявши $\psi_u = 0$:

$$\dot{U} = U, \quad (2.61)$$

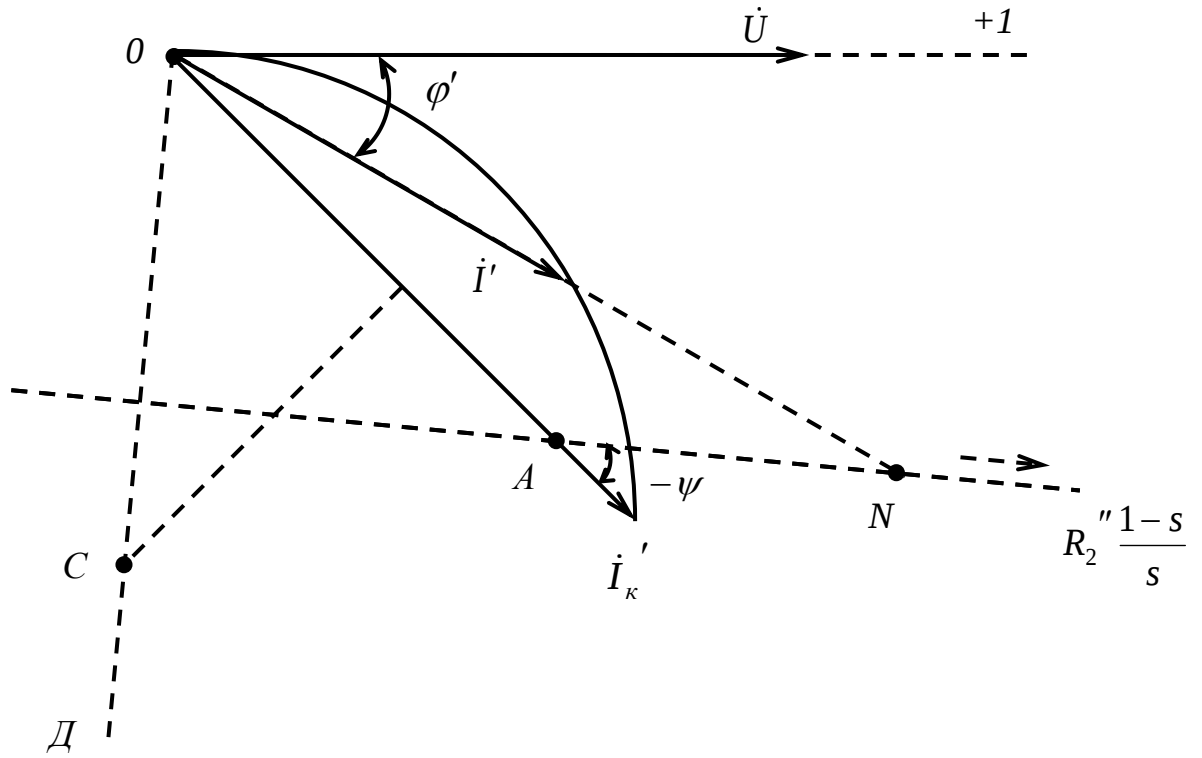


Рис. 2.6. Кругова діаграму струму.

Запишемо комплекс повної потужності в зазначеній вітці:

$$\tilde{S}' = \dot{U} I'^*, \quad (2.62)$$

$$\text{де } I' = I e^{j\varphi'}, \quad (2.63)$$

$$\text{Тоді } \tilde{S}' = UI e^{j\varphi'} = S e^{j\varphi'}, \quad (2.64)$$

В іншому вигляді

$$\tilde{S}' = \dot{U} \frac{I_{\kappa}'^*}{1 + \frac{R_2'' (1-s)}{s} e^{j\psi}}, \quad (2.65)$$

$$\text{де } I_{\kappa}'^* = I_{\kappa}' e^{j\varphi_{\kappa}'}, \quad (2.66)$$

Підставимо $\dot{U}$ й I_{κ}' в (2.65) і одержимо

$$\tilde{S}' = \frac{U I_{\kappa}' e^{j\varphi_{\kappa}'}}{1 + \frac{R_2'' (1-s)}{s} e^{j\psi}} = \frac{\tilde{S}_{\kappa}'}{1 + \frac{R_2'' (1-s)}{s} e^{j\psi}}, \quad (2.67)$$

Рівняння (2.67) являє собою рівняння кругової діаграми комплексу повної потужності $\tilde{S}'$.

Побудуємо кругову діаграму комплексу повної потужності (рис. 2.7)

Таким чином, за допомогою кругової діаграми комплексу повної потужності $\tilde{S}'$ можна знайти змінні втрати активної потужності у функції ковзання s .

Для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 розрахуємо кругову діаграму комплексу повної потужності:

$$Z = R_1' + R_2'' + j(X_1' + X_2'') = 4,985e^{j60^\circ} \text{ Ом},$$

$$I_{\kappa}' = \frac{\dot{U}}{Z} = 44,13e^{-j60^\circ} \text{ А},$$

$$\tilde{S}_{\kappa}' = \dot{U} I_{\kappa}'^* = 9708,6e^{j60^\circ} \text{ ВА}.$$

2.3 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції завантаження на валу з боку робочої машини.

Запишемо основне рівняння руху електроприводу робочої машини:

$$J \frac{d\omega}{dt} + M_c = M, \quad (2.73)$$

де J – момент інерції системи електродвигун – робоча машина, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

M_c – наведений до вала двигуна момент опору робочої машини, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

M – момент, що розвивається електродвигуном, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

У сталому режимі:

$$M_c = M, \quad (2.74)$$

Запишемо емпіричне вираження моменту опору робочої машини:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (2.75)$$

$$M_{сн} = k_z M_n, \quad (2.76)$$

де M_0 – момент рушання робочої машини, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

$M_{сн}$ – номінальний момент опору робочої машини при номінальній кутовій швидкості електродвигуна при прямій передачі, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

ω – кутова швидкість робочої машини, с^{-1} ;

ω_n – номінальна кутова швидкість електродвигуна й робочої машини при прямій передачі, c^{-1} ;

x – коефіцієнт, що характеризує робочу машину (0, 1, 2, -1);

k_z – коефіцієнт завантаження робочої машини;

M_n – номінальний момент електродвигуна, $H \cdot m$.

Представимо механічні характеристики електродвигуна на робочій ділянці й робочої машини (рис.2.8)

Знайдемо залежність M_c у функції коефіцієнта завантаження k_z й ковзання, для чого підставимо в (2.76) залежності:

$$M_{cn} = k_z M_n, \quad (2.77)$$

$$\text{і } \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{1-s}{1-s_n}, \quad (2.78)$$

У результаті одержимо:

$$M_c = M_0 + (k_z M_n - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x, \quad (2.79)$$

Знайдемо залежність M у функції ковзання s , розглянувши подібні трикутники:

$$\frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0 - \omega} = \frac{M_n}{M}, \quad (2.80)$$

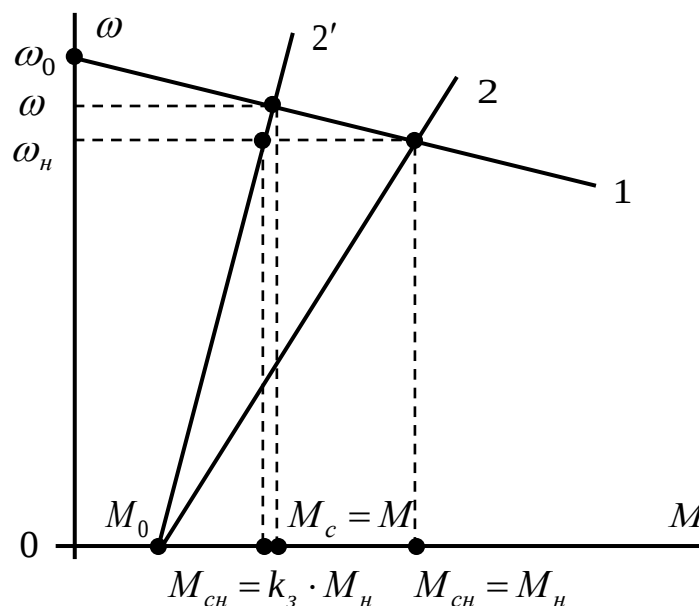


Рис. 2.8. Механічні характеристики електродвигуна 1 і робочої машини при різному завантаженні 2 і 2'.

Після перетворення одержуємо:

$$M = M_n \frac{s}{s_n}, \quad (2.81)$$

Підставляємо (2.79) і (2.81) в (2.75) і одержуємо:

$$M_n \frac{s}{s_n} = M_0 + (k_z M_n - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x, \quad (2.82)$$

Перепишемо (2.82) у відносних одиницях:

$$\frac{s}{s_n} = m_0 + (k_z - m_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x, \quad (2.83)$$

$$\text{де} \quad m_0 = \frac{M_0}{M_n}. \quad (2.84)$$

Знайдемо залежність ковзання від коефіцієнта завантаження.

Для приводу робочої машини з незалежною механічною характеристикою ($x=0$) знаходимо:

$$s = s_n k_z. \quad (2.85)$$

Зробимо розрахунок ковзання для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3. Результати проведених розрахунків заносимо в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
s	0,007	0,010	0,013	0,017	0,020	0,023	0,026	0,030	0,033	0,036	0,040

На підставі отриманих даних будемо залежність ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження (рис. 2.9).

Досліджуємо втрати активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми. Обрані масштаби:

$$m_z = 0,2 \left[\frac{O_M}{M_M} \right],$$

$$m_s = 25 \left[\frac{B_A}{M_M} \right].$$

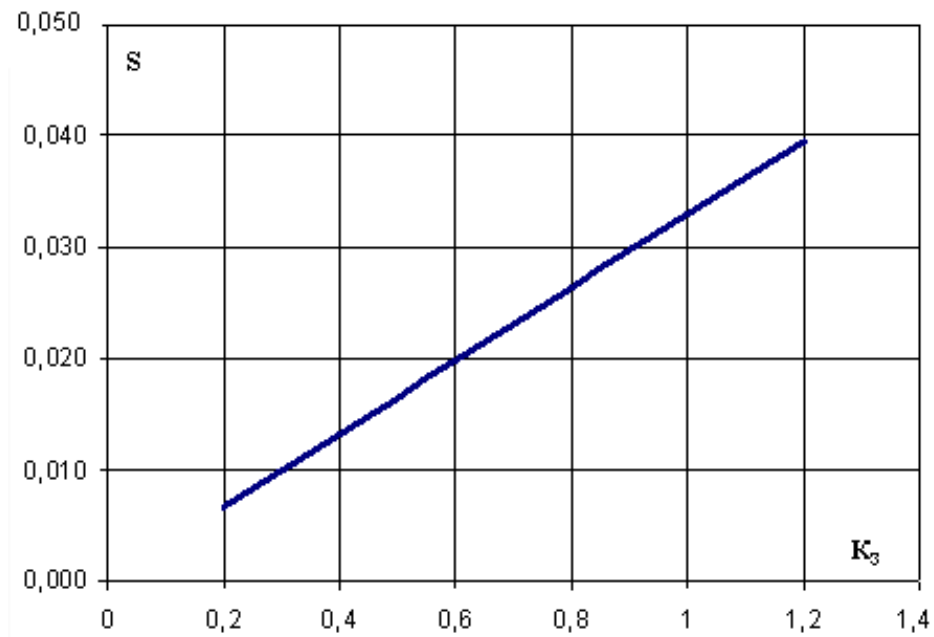


Рис. 2.9. Залежність ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження.

Результати заносимо в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
s	0,007	0,010	0,013	0,017	0,020	0,023	0,026	0,030	0,033	0,036	0,040
$R_2' \frac{1-s}{s},$ $Ом$	142,7	99,6	76,4	58,2	49,3	42,7	37,7	32,5	29,5	26,9	24,1
$AN, мм$	713,5	498	382	291	246	213	188	162	147	134	120,5
$\frac{R_1' + R_2''}{R_1' + R_2''/s}$	0,017	0,024	0,031	0,04	0,048	0,054	0,061	0,069	0,076	0,083	0,091
$O''L, мм$	5,62	11	17	24,5	30	35,5	40,8	47,9	58	59	64,8
$P', Вт$	421	852	127	1837	2250	2662	3060	3592	4350	4361	4860
$\Delta P_m, Вт$	7,17	20,4	39,5	73,5	108	143,8	186,6	248	330,6	362	442
$P_2, Вт$	414	832	1235	1764	2142	2519	2873	3345	4019	4058	4418
$\Delta P_{const}, Вт$	274	274	274	274	274	274	274	274	274	274	274
$\Delta P, Вт$	281	294	313	347	382	417,8	460,7	522	604,6	641,3	716

Будуємо залежність (рис. 2.10) втрат активної потужності в обмотках і втрат активної потужності в цілому в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження, тобто

$$\Delta P_{\text{м}} = f(\kappa_3) \text{ і } \Delta P = f'(\kappa_3).$$

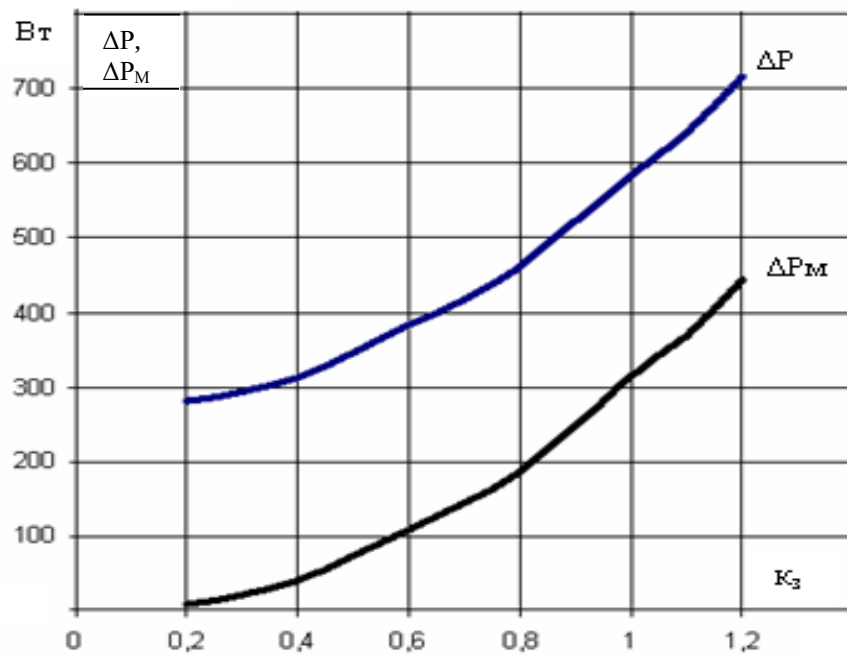


Рис. 2.10. Залежність втрат активної потужності в обмотках і втрат активної потужності в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження.

Будуємо залежність (рис. 2.11.) коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні, тобто $\kappa_{\theta} = \frac{\Delta P}{P_2}$

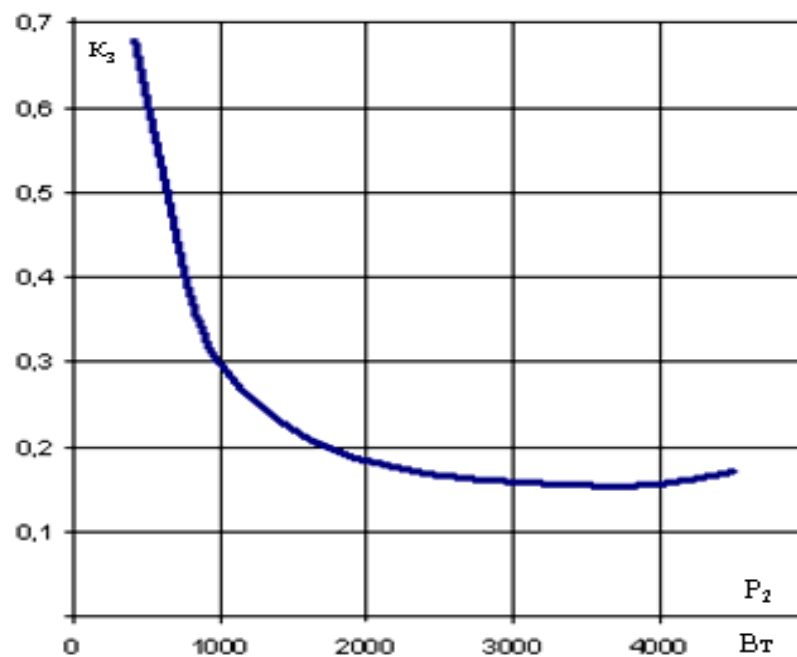


Рис. 2.11. Залежність коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні.

Уведемо поняття коефіцієнта втрат активної енергії в електродвигуні, під яким будемо розуміти відношення втрат активної потужності в електродвигуні до номінальних втрат активної потужності, тобто

$$\kappa_{ne} = \frac{\Delta P}{\Delta P_n}.$$

Для зазначеного електродвигуна $\Delta P_n = 624 \text{ Вт}$. Розрахуємо значення цього коефіцієнта. Результати заносимо в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
κ_{ne}	0,451	0,472	0,502	0,557	0,612	0,670	0,738	0,836	0,938	1,028	1,148

Будуємо залежність коефіцієнта втрат активної енергії у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна (рис. 2.12).

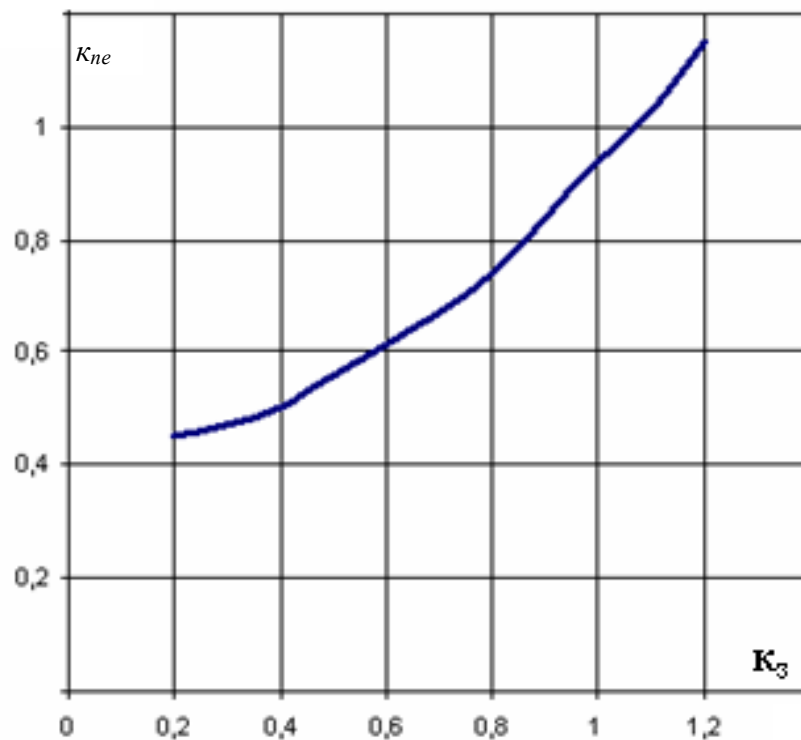


Рис. 2.12. Залежність коефіцієнта втрат активної енергії у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна.

Для приводу робочої машини з лінійно-зростаючою механічною характеристикою ($x=1$) знаходимо:

$$s = \frac{k_3 - m_0 s_H}{\frac{1 - s_H}{s_H} + k_3 - m_0}. \quad (2.86)$$

Зробимо розрахунок ковзання для електродвигуна типорозміру 4A100S2У3. Результати проведених розрахунків заносимо в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
s	0,007	0,010	0,013	0,017	0,020	0,023	0,027	0,030	0,033	0,036	0,039

На підставі отриманих даних будуюмо залежність ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження для приводу робочої машини з лінійно-зростаючою механічною характеристикою (рис. 2.13).

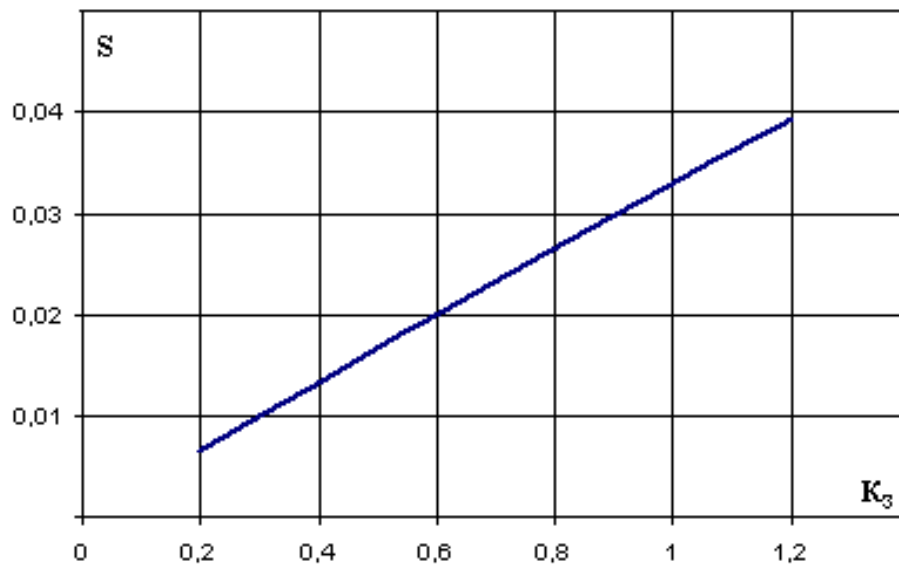


Рис. 2.13. Залежність ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження для приводу робочої машини з лінійно-зростаючою механічною характеристикою.

Для приводу робочої машини з параболічною механічною характеристикою ($x=2$) знаходимо:

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2.87)$$

$$\text{де } a = k_3 - m_0; \quad (2.88)$$

$$b = -2(k_3 - m_0) - \frac{(1 - s_n)^2}{s_n}; \quad (2.89)$$

$$c = m_0(1 - s_n)^2 + (k_3 - m_0). \quad (2.90)$$

Зробимо розрахунок ковзання для електродвигуна типорозміру 4A100S2У3.
Результати проведених розрахунків заносимо в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

k_3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
a	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
b	-28,53	-28,73	-28,93	-29,13	-29,33	-29,56	-29,73	-29,9	-30,13	-30,336
c	0,287	0,387	0,487	0,587	0,687	0,787	0,887	0,987	1,087	1,187
s	0,01	0,014	0,017	0,02	0,024	0,026	0,03	0,033	0,036	0,039

На підставі отриманих даних будемо залежність ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження для приводу робочої машини з параболічною механічною характеристикою (рис. 2.14).

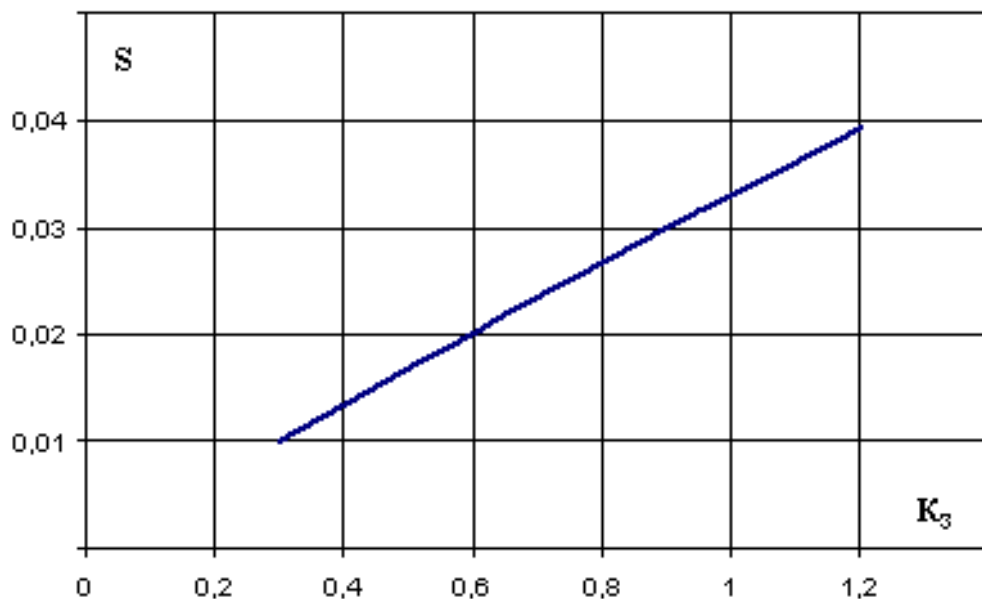


Рис. 2.14. Залежність ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження для приводу робочої машини з параболічною механічною характеристикою.

Таким чином, при номінальній напрузі ковзання електродвигуна залежить від моменту рушання робочої машини (m_0), коефіцієнта її завантаження (k_s) й номінального ковзання (s_n).

Втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні залежать від коефіцієнта завантаження робочої машини. Вони однакові для приводу робочих машин з незалежною від швидкості, лінійно - зростаючою й параболічною механічними характеристиками.

2.4 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції рівня напруги живлення й завантаження на валу з боку робочої машини.

Для дослідження впливу зниженої напруги на режим роботи електродвигуна скористаємося механічними характеристиками електродвигуна на робочій ділянці при номінальній напрузі (характеристика 1) і зниженій напрузі (характеристика 2), а також механічною характеристикою робочої машини (характеристика 3) (рис. 2.15).

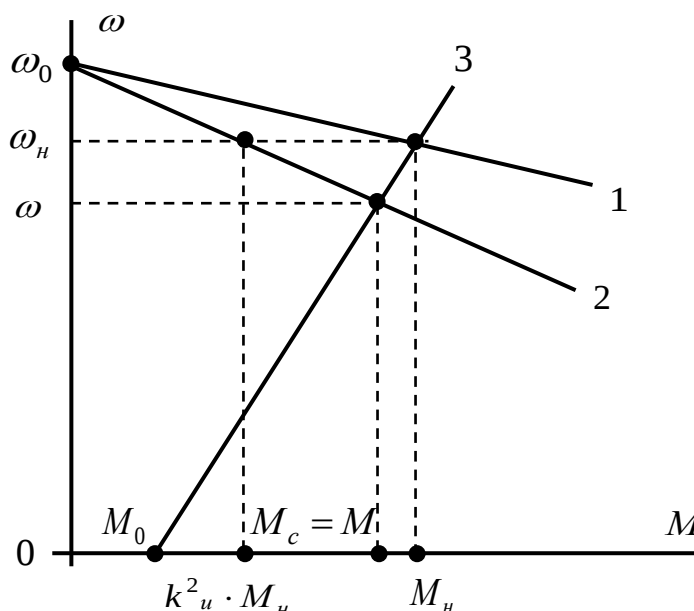


Рис. 2.15. Механічні характеристики електродвигуна і робочої машини.

З подібних трикутників маємо:

$$\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0 - \omega_n} = \frac{M}{k_u M_n}, \quad (2.91)$$

звідки знаходимо:

$$M = \frac{s}{s_n} k_u^2 M_n, \quad (2.92)$$

Підставляємо (2.92) і (2.79) в (2.75):

$$\frac{k_u^2 M_n}{s_n} s = M_0 + (k_3 M_n - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x, \quad (2.93)$$

Перепишемо рівняння у відносних одиницях:

$$k_u^2 \frac{s}{s_n} = m_0 + (k_3 - m_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x, \quad (2.94)$$

Знайдемо залежність ковзання s від кратності прикладеної напруги k_u й коефіцієнта завантаження k_3 .

Для приводу робочої машини з незалежною механічною характеристикою ($x=0$) знаходимо:

$$s = \frac{k_3}{k_u^2} s_n. \quad (2.95)$$

Зробимо розрахунок ковзання для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3. Результати проведених розрахунків для коефіцієнтів зниження напруги $k_u = 0,8; 0,85; 0,9$ заносимо відповідно в таблиці 2.7; 2.10 і 2.13. На підставі отриманих даних будуємо залежності ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження й коефіцієнта зниження напруги (рис. 2.16; 2.20; 2.24)

Досліджуємо ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,8$ (табл. 2.7).

Таблиця 2.7

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
s	0,01	0,015	0,021	0,026	0,031	0,036	0,041	0,046	0,052	0,056	0,062

Будуємо залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,8$ (рис. 2.16)

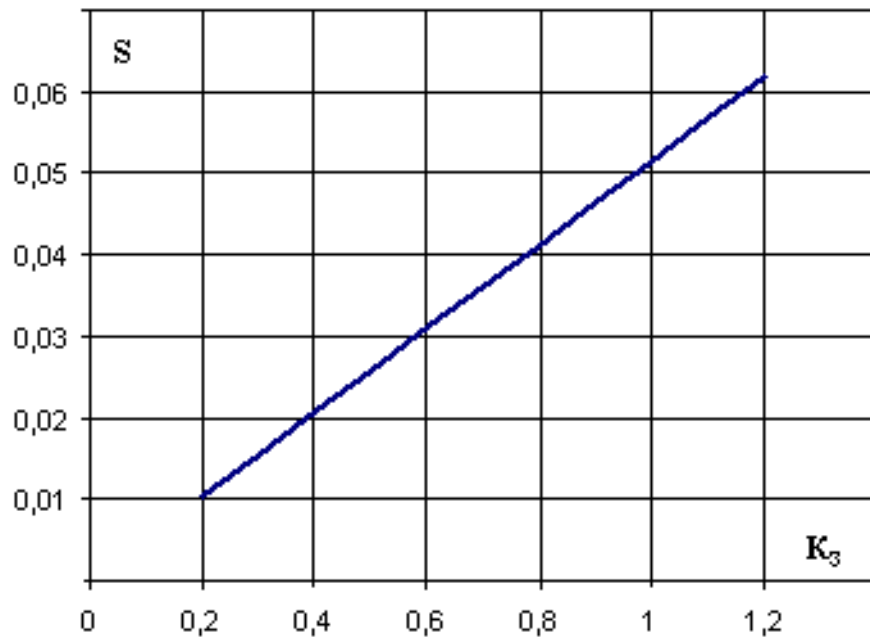


Рис. 2.16. Залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,8$.

Досліджуємо втрати активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми. Обрані масштаби:

$$m_z = 0,2 \left[\frac{\text{Ом}}{\text{мм}} \right], \quad m_s = 25 \left[\frac{\text{ВА}}{\text{мм}} \right].$$

Результати заносимо в табл. 2.8.

Таблиця 2.8

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
s	0,01	0,015	0,021	0,026	0,031	0,036	0,041	0,046	0,052	0,056	0,062
$R_2'' \frac{1-s}{s}, \text{Ом}$	99,6	66,1	46,9	37,7	31,4	26,9	23,5	20,9	18,3	17,0	15,2
$AN, \text{мм}$	498	330	234	188	157	134	117	104	91,7	84,8	76,1
$\frac{R_1' + R_2''}{R_1' + R_2''/s}$	0,025	0,037	0,051	0,063	0,074	0,085	0,097	0,108	0,121	0,129	0,142
$O''L, \text{мм}$	11,2	17,2	24,2	30	38,4	40,7	46	51	56,9	60,6	66
$P', \text{Вм}$	536,2	823,2	1162	1440	1843	1956	2208	2449	2729	2909	3169
$\Delta P_{\text{м}}, \text{Вм}$	8	19	38	58	87	107	136	169	211	240	288
$P_2, \text{Вм}$	528	804	1124	1382	1756	1850	2072	2281	2519	2668	2881
$\Delta P_{\text{const}}, \text{Вм}$	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
$\Delta P, \text{Вм}$	183	194	213	233	262	282	311	344	386	415	463

Будуємо залежність (рис. 2.17) втрат активної потужності в обмотках і втрат активної потужності в цілому в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження, тобто

$$\Delta P_M = f(\kappa_3) \text{ і } \Delta P = f'(\kappa_3).$$

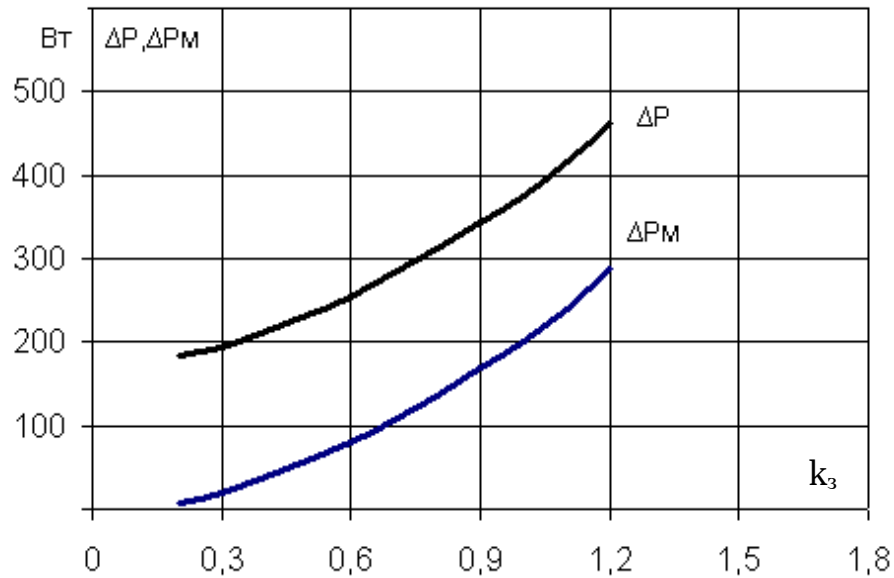


Рис. 2.17. Залежність втрат активної потужності в обмотках і втрат активної потужності в цілому в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження.

Будуємо залежність (рис. 2.18) коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні, тобто

$$\kappa_\theta = \frac{\Delta P}{P_2}.$$

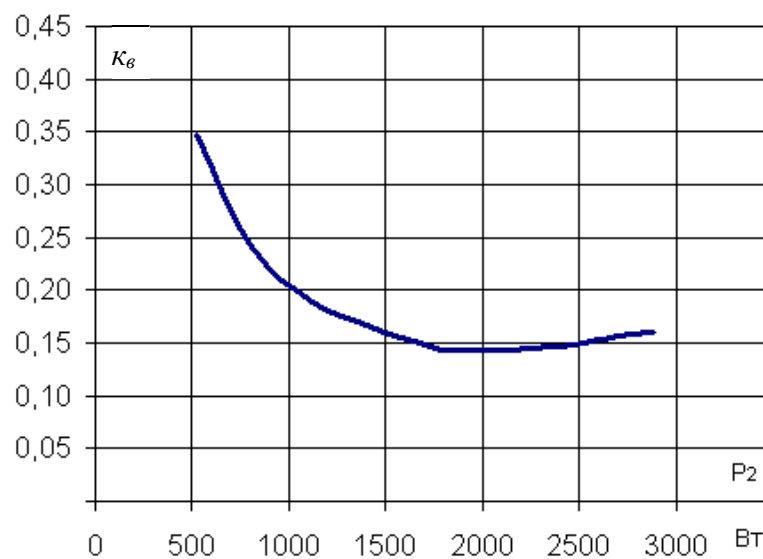


Рис. 2.18. Залежність коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні.

Досліджуємо коефіцієнт втрат активної енергії в електродвигуні, під яким розуміємо відношення втрат активної потужності в електродвигуні до номінальних втрат активної потужності, тобто

$$\kappa_{ne} = \frac{\Delta P}{\Delta P_n}$$

Для зазначеного електродвигуна $\Delta P_n = 624 \text{ Вт}$. Розрахуємо значення цього коефіцієнта. Результати заносимо в табл. 2.9.

Таблиця 2.9

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
κ_{ne}	0,29	0,31	0,34	0,37	0,42	0,45	0,50	0,55	0,62	0,67	0,74

Будуємо залежність коефіцієнта втрат активної енергії у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна (рис. 2.19).

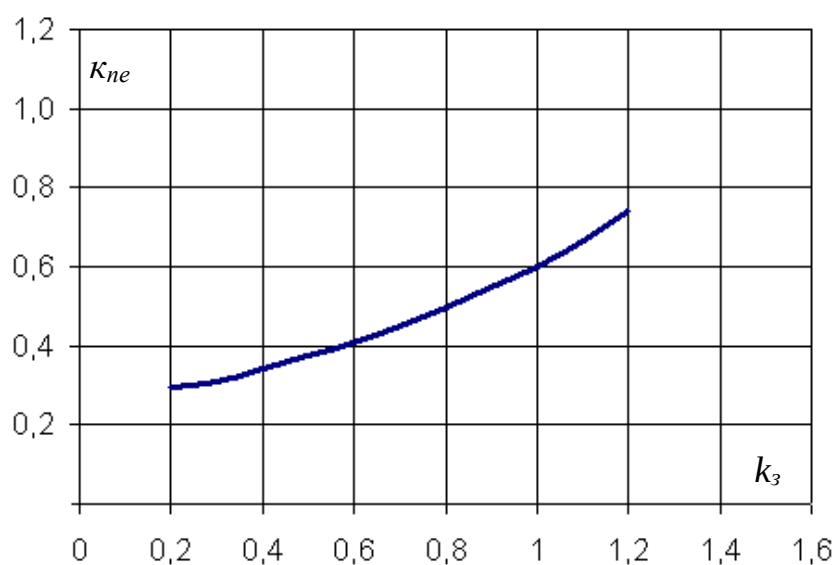


Рис. 2.19. Залежність коефіцієнта втрат активної енергії у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна.

Досліджуємо ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,85$ (табл. 2.10).

Таблиця 2.10

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
s	0,009	0,014	0,018	0,023	0,027	0,032	0,036	0,04	0,046	0,05	0,055

Будуємо залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,85$ (рис. 2.20)

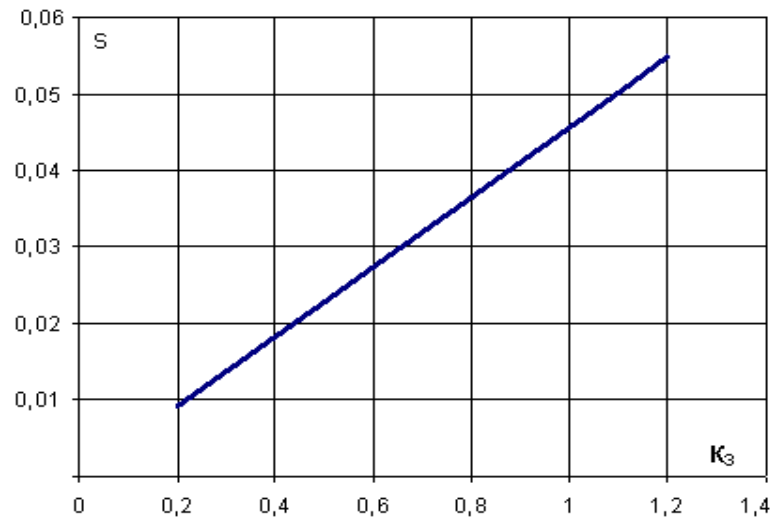


Рис. 2.20. Залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,85$.

Досліджуємо втрати активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми. Результати заносимо в табл. 2.11.

Таблиця 2.11

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
s	0,009	0,014	0,018	0,023	0,027	0,032	0,036	0,04	0,046	0,05	0,055
$R_2' \frac{1-s}{s}, \text{Ом}$	110,8	70,9	54,9	42,7	36,3	30,4	26,9	24,1	20,9	19,1	17,3
$AN, \text{мм}$	554	354	274	214	181	152	135	121	104	96	86
$\frac{R_1' + R_2''}{R_1' + R_2''/s}$	0,022	0,034	0,044	0,056	0,065	0,076	0,085	0,094	0,108	0,116	0,127
$O''L, \text{мм}$	13,9	20,6	28,5	34,9	41,1	47,1	53	58,6	65,2	69,4	75,5
$P', \text{Вт}$	753,	1117	1544	1891	2227	2552	2872	3175	3533	3761	4091
$\Delta P_m, \text{Вт}$	12	28	49	76	104	141	177	216	275	316	375
$P_2, \text{Вт}$	741	1090	1495	1815	2123	2411	2695	2959	3258	3445	3716
$\Delta P_{\text{const}}, \text{Вт}$	198	198	198	198	198	198	198	198	198	198	198
$\Delta P, \text{Вт}$	210	226	247	274	302	339	375	414	472	514	573

Будуємо залежність (рис. 2.21) втрат активної потужності в обмотках і втрат активної потужності в цілому в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження, тобто

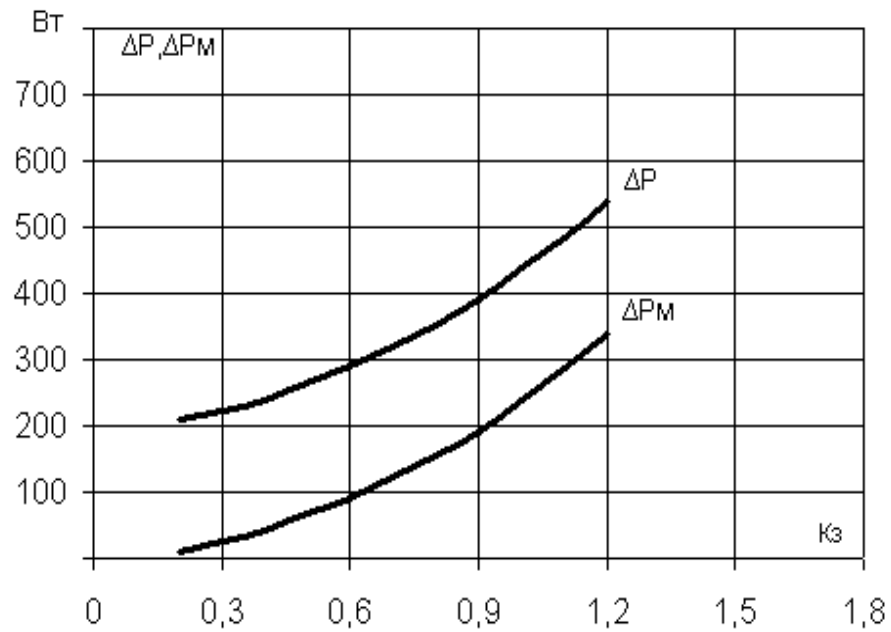


Рис. 2.21. Залежність втрат активної потужності в обмотках і втрат активної потужності в цілому в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження.

Будуємо залежність (рис. 2.22) коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні, тобто

$$\kappa_6 = \frac{\Delta P}{P_2}.$$

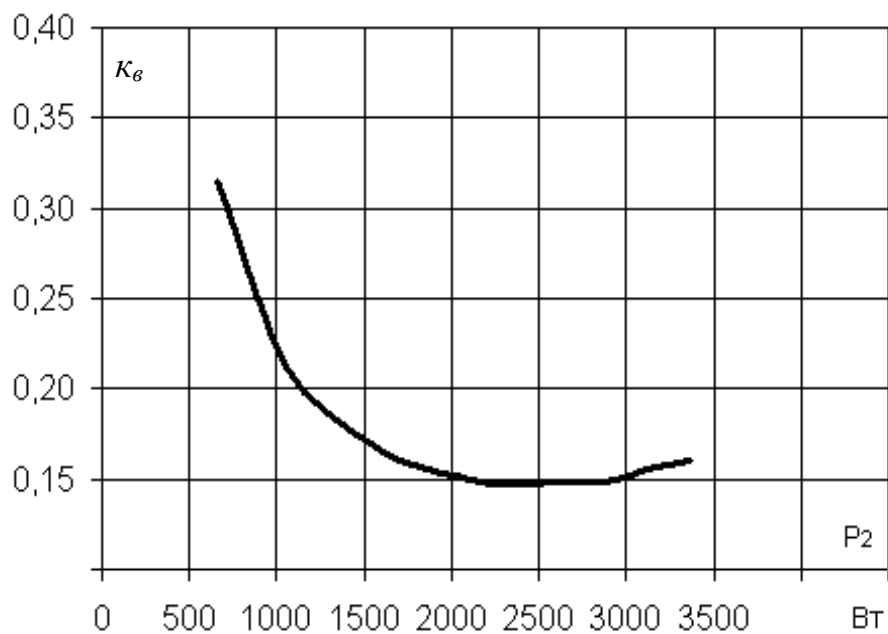


Рис. 2.22. Залежність коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні.

Досліджуємо коефіцієнт втрат активної енергії в електродвигуні, під яким розуміємо відношення втрат активної потужності в електродвигуні до номінальних втрат активної потужності, тобто:

$$\kappa_{ne} = \frac{\Delta P}{\Delta P_n}.$$

Для зазначеного електродвигуна $\Delta P_n = 624 \text{ Вт}$. Розрахуємо значення цього коефіцієнта. Результати заносимо в табл. 2.12.

Таблиця 2.12

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
κ_{ne}	0,34	0,36	0,40	0,44	0,48	0,54	0,60	0,66	0,74	0,82	0,92

Будуємо залежність коефіцієнта втрат активної енергії у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна (рис. 2.23).

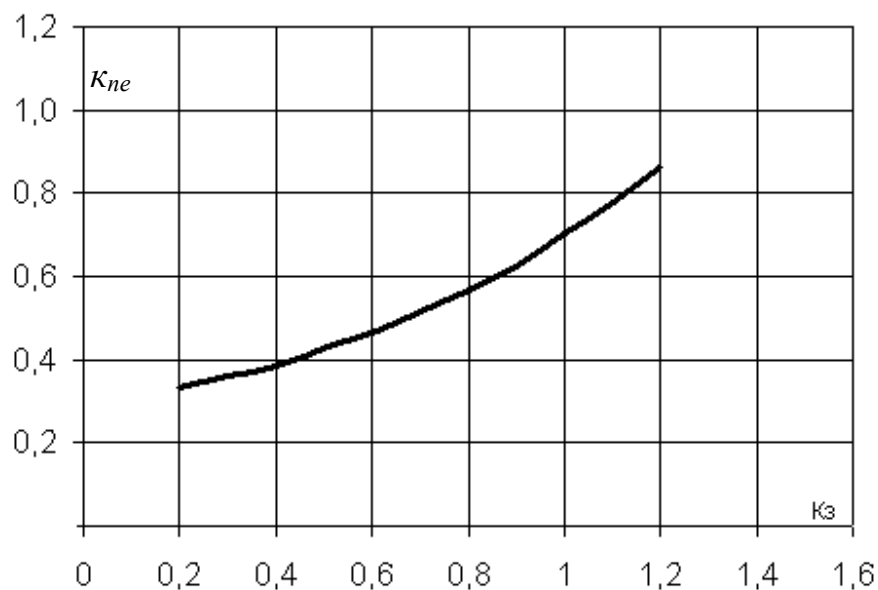


Рис. 2.23. Залежність коефіцієнта втрат активної енергії у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна.

Досліджуємо ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,9$ (табл. 2.13).

Таблиця 2.13

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
s	0,008	0,012	0,016	0,02	0,024	0,028	0,033	0,037	0,041	0,045	0,049

Будуємо залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,9$ (рис. 2.24).

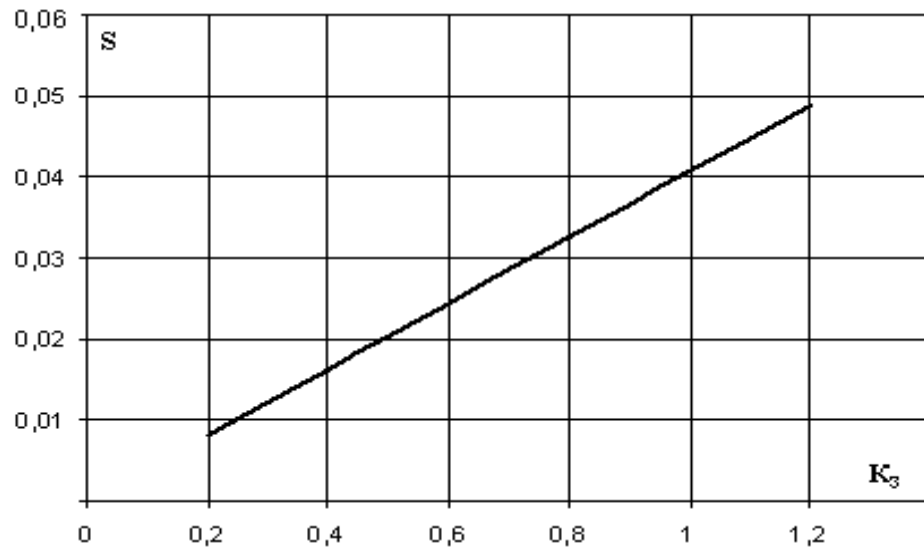


Рис. 2.24. Залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,9$.

Досліджуємо втрати активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми. Результати заносимо в табл. 2.14.

Таблиця 2.14

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
s	0,008	0,012	0,016	0,02	0,024	0,028	0,033	0,037	0,041	0,045	0,049
$R_2 \frac{1-s}{s}, Ом$	125	83	62	49	41	35	29	26	24	21	20
$AN, мм$	624	414	309	246	205	175	147	131	118	107	98
$\frac{R_1' + R_2''}{R_1' + R_2''/s}$	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,11
$O''L, мм$	12	18	24	30	36	41	48	53	59	64	69
$P', Вт$	747	1114	1473	1829	2172	2512	2926	3248	3560	3870	4167
$\Delta P_m, Вт$	12	27	47	72	102	137	186	231	278	330	385
$P_2, Вт$	735	1087	1427	1757	2071	2375	2739	3018	3282	3539	3782
$\Delta P_{const}, Вт$	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222
$\Delta P, Вт$	234	249	269	294	324	359	408	453	500	552	607

Будуємо залежність (рис. 2.25) втрат активної потужності в обмотках і втрат активної потужності в цілому в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження, тобто

$$\Delta P_u = f(\kappa_z) \text{ і } \Delta P = f'(\kappa_z).$$

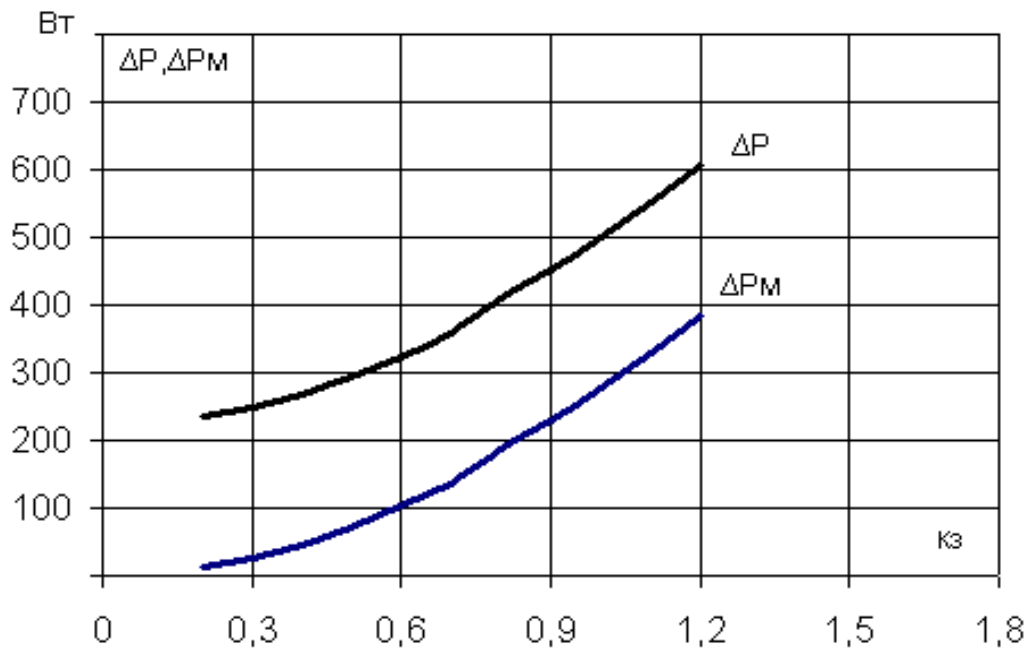


Рис. 2.25. Залежність втрат активної потужності в обмотках і втрат активної потужності в цілому в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження.

Будуємо залежність (рис. 2.26) коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні, тобто

$$\kappa_\theta = \frac{\Delta P}{P_2}.$$

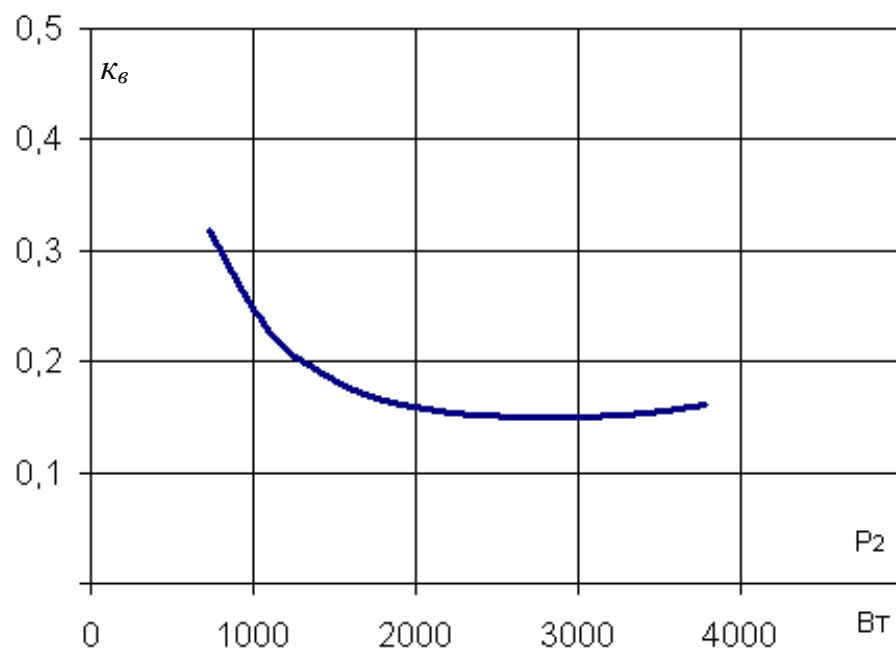


Рис. 2.26. Залежність коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні.

Досліджуємо коефіцієнт втрат активної енергії в електродвигуні, під яким розуміємо відношення втрат активної потужності в електродвигуні до номінальних втрат активної потужності, тобто

$$\kappa_{ne} = \frac{\Delta P}{\Delta P_n}.$$

Для зазначеного електродвигуна $\Delta P_n = 624 \text{ Вт}$. Розрахуємо значення цього коефіцієнта. Результати заносимо в табл. 2.15.

Таблиця 2.15

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
κ_{ne}	0,37	0,40	0,43	0,47	0,52	0,57	0,65	0,73	0,80	0,89	0,97

Будуємо залежність коефіцієнта втрат активної енергії у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна (рис. 2.27).

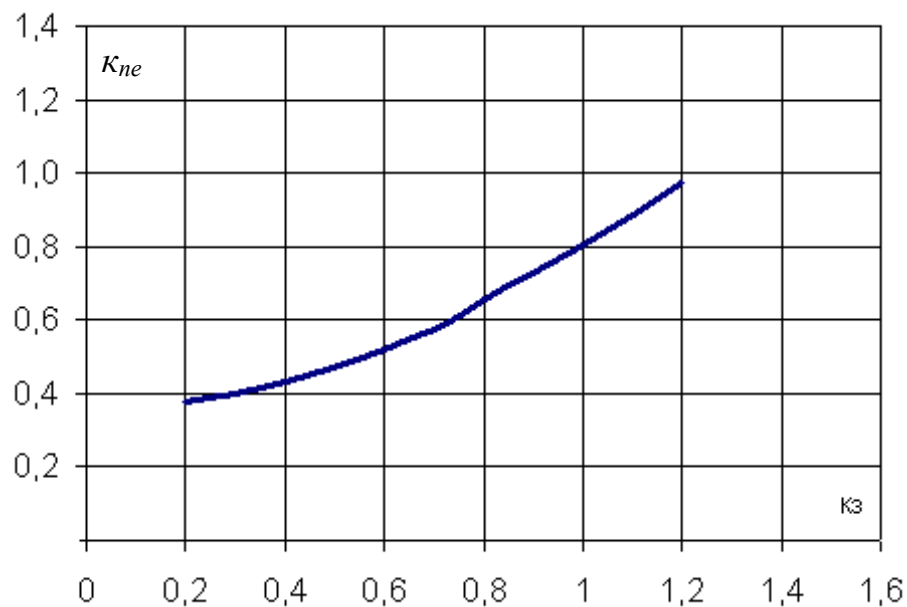


Рис. 2.27. Залежність коефіцієнта втрат активної енергії у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна.

Для приводу робочої машини з лінійно-зростаючою механічною характеристикою ($\chi = 1$) знаходимо:

$$s = \frac{k_z - m_0 s_n}{\frac{1 - s_n}{s_n} k_u^2 + k_z - m_0}. \quad (2.96)$$

Зробимо розрахунок ковзання для електродвигуна типорозміру 4A100S2У3. Результати проведених розрахунків для коефіцієнтів зниження напруги $k_u = 0,8; 0,85; 0,9$ заносимо відповідно в таблиці 2.16; 2.17; 2.18. На підставі отриманих даних будемо залежності ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження (рис. 2.28; 2.29 і 2.30)

Досліджуємо ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,8$ (табл. 2.16).

Таблиця 2.16

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
s	0,010	0,016	0,021	0,026	0,031	0,036	0,041	0,046	0,051	0,056	0,060

Будуємо залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,8$ (рис. 2.28)

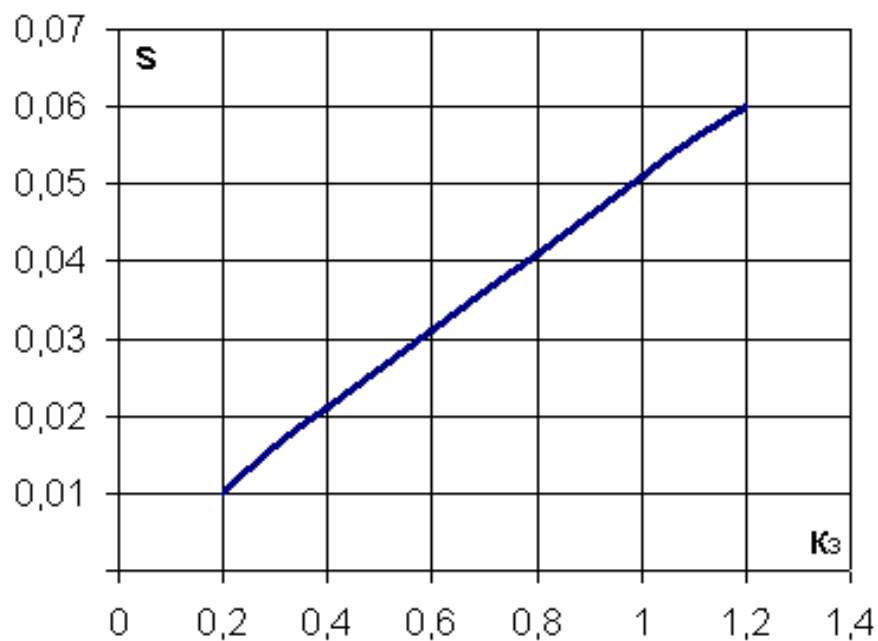


Рис. 2.28. залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,8$.

Досліджуємо ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,85$ (табл. 2.17).

Таблиця 2.17

κ_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
s	0,009	0,014	0,018	0,023	0,028	0,032	0,036	0,041	0,045	0,050	0,054

Будуємо залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,85$ (рис. 2.29)

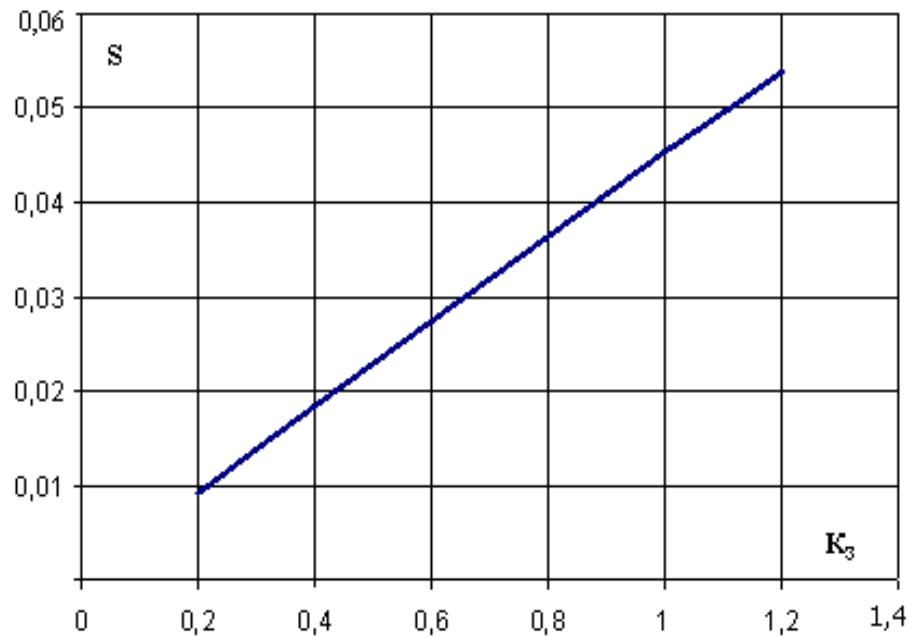


Рис. 2.29. Залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,85$.

Досліджуємо ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,9$ (табл. 2.18).

Таблиця 2.18

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
s	0,008	0,012	0,016	0,021	0,025	0,029	0,033	0,037	0,040	0,044	0,048

Будуємо залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,9$ (рис. 2.30)

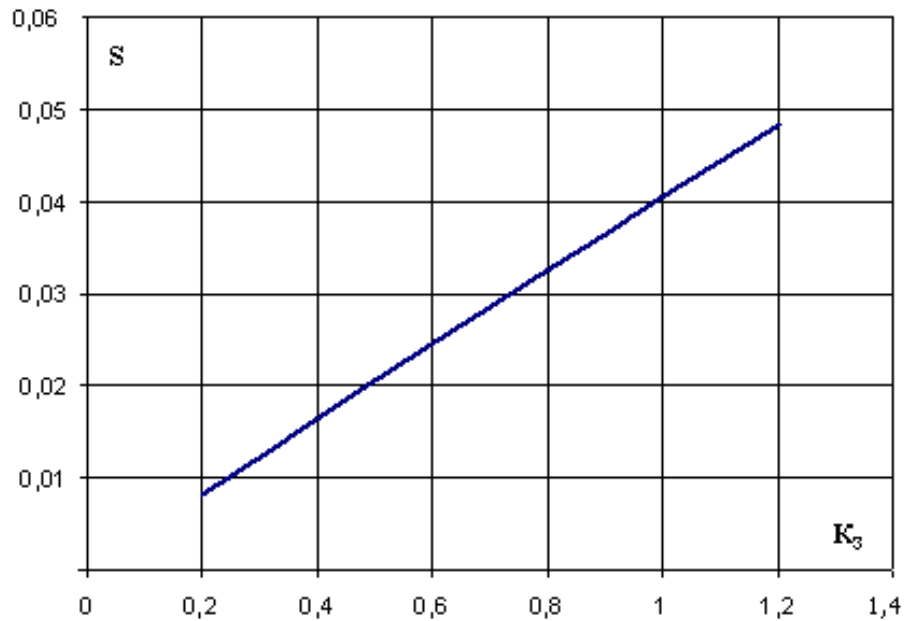


Рис. 2.30. Залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,9$.

Для приводу робочої машини з параболічною механічною характеристикою ($x = 2$) знаходимо:

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2.97)$$

$$\text{де } a = k_3 - m_0;$$

$$b = -2(k_3 - m_0) - \frac{(1 - s_n)^2}{s_n} k_u^2; \quad (2.98)$$

$$c = m_0(1 - s_n)^2 + (k_3 - m_0). \quad (2.99)$$

Зробимо розрахунок ковзання для електродвигуна типорозміру 4A100S2УЗ. Результати проведених розрахунків для коефіцієнтів зниження напруги $k_u = 0,8$; $0,85$; $0,9$ заносимо відповідно в таблиці 2.19; 2.20 і 2.22. На підставі отриманих даних будемо залежності ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження (рис. 2.31; 2.31 і 2.32)

Досліджуємо ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,8$ (табл. 2.19).

Таблиця 2.19

κ_3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
a	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
b	-18,34	-18,54	-18,74	-18,94	-19,14	-19,34	-19,54	-19,74	-19,94	-20,14
c	0,287	0,387	0,487	0,587	0,687	0,787	0,887	0,987	1,087	1,187
s	0,016	0,021	0,026	0,031	0,036	0,041	0,045	0,050	0,055	0,059

Будуємо залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,8$ (рис. 2.31).

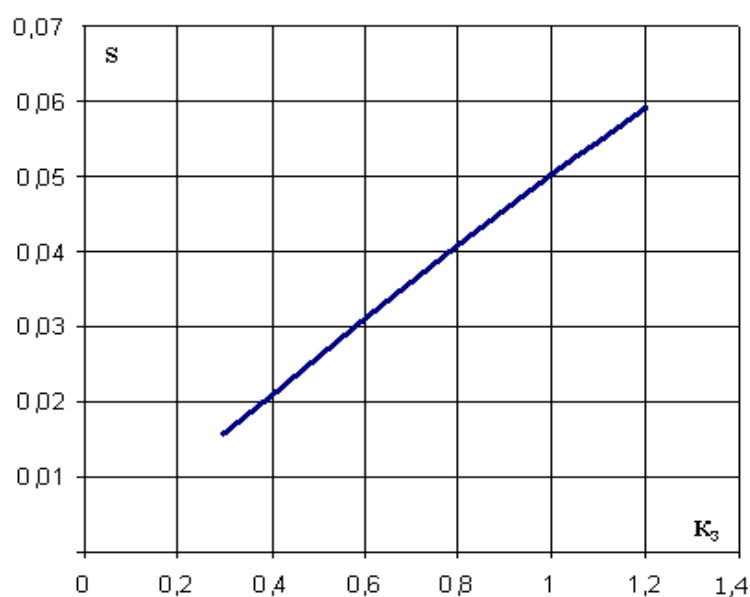


Рис. 2.31. Залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,8$.

Досліджуємо ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,85$ (табл. 2.20).

Таблиця 2.20

k_3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
a	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
b	-20,67	-20,87	-21,07	-21,27	-21,47	-21,67	-21,87	-22,07	-22,27	-22,47
c	0,287	0,387	0,487	0,587	0,687	0,787	0,887	0,987	1,087	1,187
s	0,014	0,019	0,023	0,028	0,032	0,036	0,041	0,045	0,049	0,053

Будуємо залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,85$ (рис. 2.32)

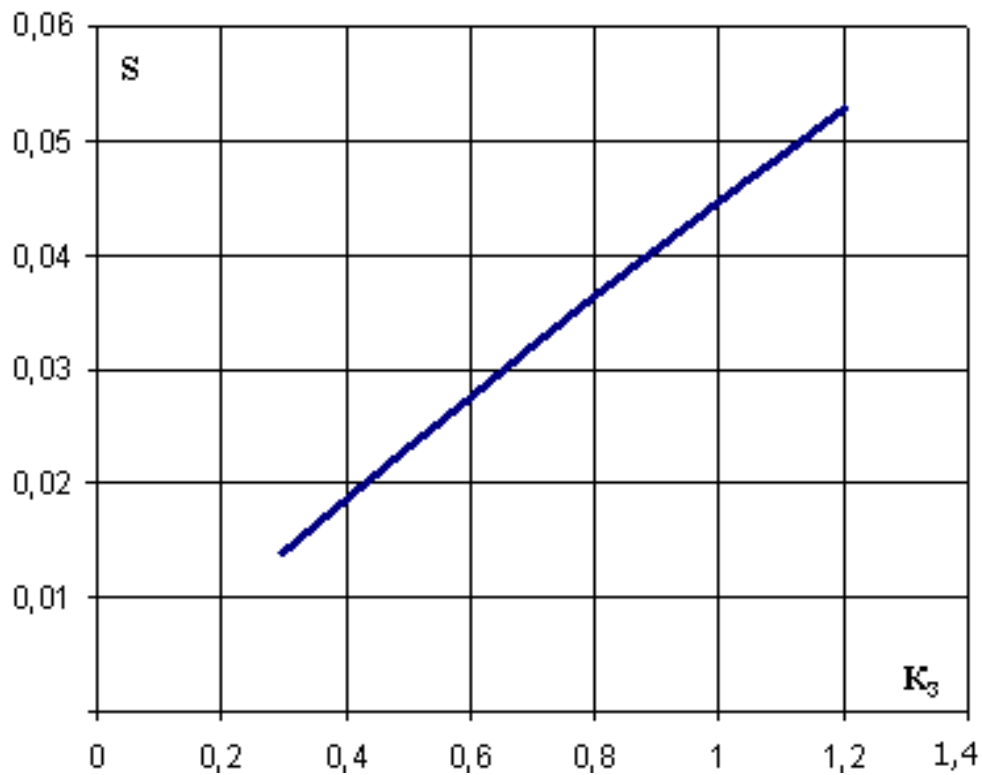


Рис. 2.32. Залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,85$.

Досліджуємо ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,9$ (табл. 2.21).

Таблиця 2.21

k_z	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
a	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
b	-23,15	-23,35	-23,55	-23,75	-23,95	-24,15	-24,35	-24,55	-24,75	-24,95
c	0,287	0,387	0,487	0,587	0,687	0,787	0,887	0,987	1,087	1,187
s	0,012	0,017	0,021	0,025	0,029	0,033	0,036	0,040	0,044	0,048

Будуємо залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,9$ (рис. 2.33).

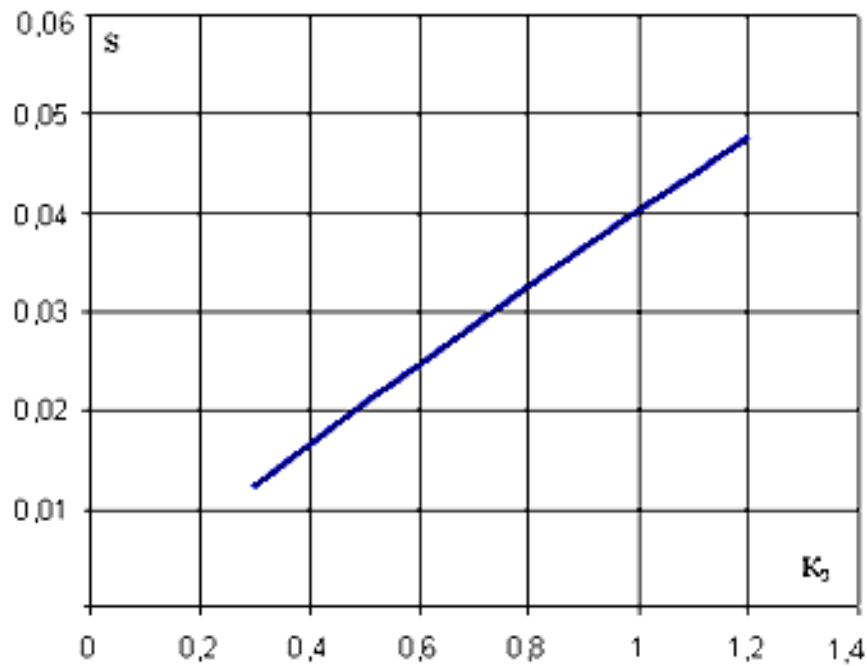


Рис. 2.33. Залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при коефіцієнті зниження напруги $k_u = 0,9$.

Для дослідження впливу підвищення напруги на режим роботи електродвигуна скористаємося механічними характеристиками електродвигуна при номінальній напрузі (характеристика 1) і підвищеній напрузі (характеристика 2), а також механічною характеристикою робочої машини (характеристика 3) (рис. 2.34).

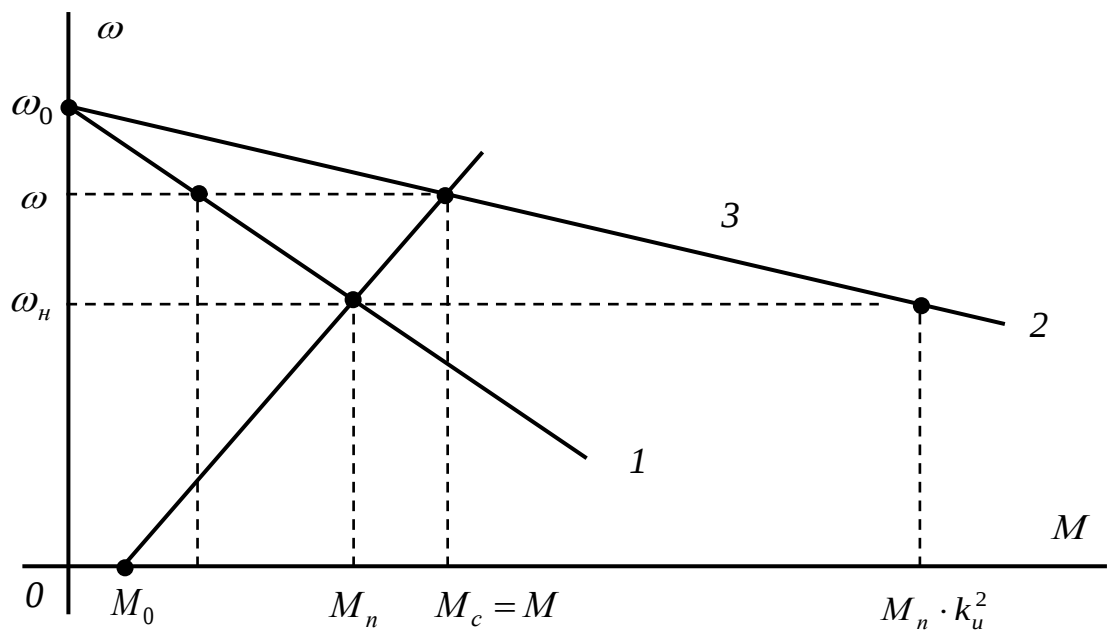


Рис. 2.34. Механічні характеристики електродвигуна і робочої машини.

З подібних трикутників можна записати:

$$\frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0 - \omega} = \frac{M_n k_u^2}{M}, \quad (2.100)$$

звідки знаходимо:

$$M = \frac{M_n k_u^2}{s_n} s. \quad (2.101)$$

Таким чином, ми одержали вираз для моменту, що розвивається електродвигуном, який аналогічний (2.92). Тому залежність ковзання s від кратності прикладеної напруги й коефіцієнта завантаження будуть описуватися виразами (2.95), (2.96), (2.97). Аналіз цих залежностей показує, що зі збільшенням напруги ковзання буде зменшуватися, і буде зменшуватися сила струму $\dot{I}'$, але при цьому будуть збільшуватися струм, що намагнічує, і, отже, втрати активної потужності в магнітопроводі.

Для приводу робочої машини з незалежною механічною характеристикою ($x=0$) знаходимо:

$$s = \frac{k_3}{k_u^2} s_n. \quad (2.102)$$

Зробимо розрахунок ковзання для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3. Результати проведених розрахунків для коефіцієнта відхилення напруги $k_u=1,1$ заносимо в табл. 2.22.

Таблиця 2.22

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
s	0,0055	0,0082	0,0109	0,0136	0,0164	0,0191	0,0218	0,0245	0,0273	0,03	0,0327

На підставі отриманих даних будуємо залежність ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження (рис. 2.35)

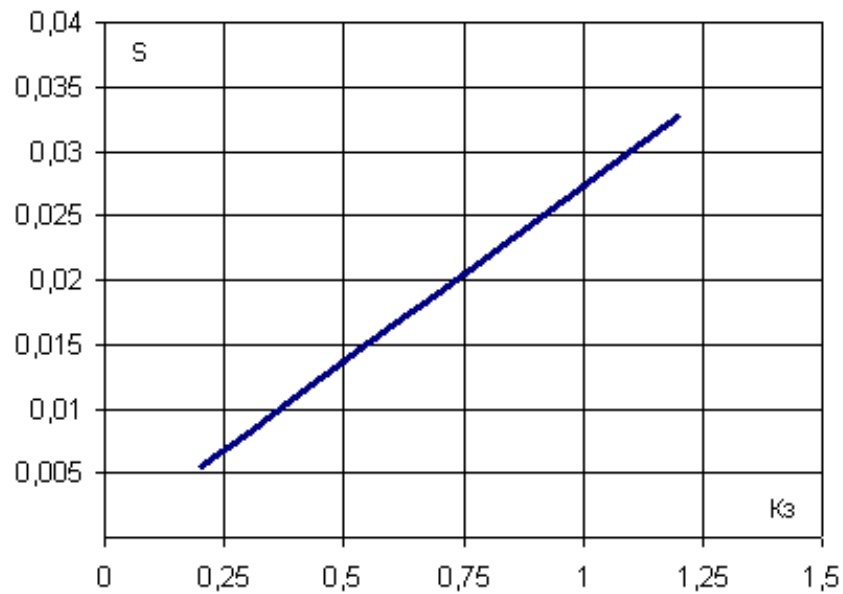


Рис. 2.35. Залежність ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження.

Досліджуємо втрати активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми. Результати заносимо в табл. 2.23.

Таблиця 2.23

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
s	0,0055	0,0082	0,0109	0,0136	0,0164	0,0191	0,0218	0,0245	0,0273	0,03	0,0327
$R_2' \frac{1-s}{s},$ $Ом$	183	122	91	73	60	52	45	40	36	33	30
$AN, мм$	917	610	456	364	302	258	226	200	179	163	149
$\frac{R_1' + R_2''}{R_1' + R_2''/s}$	0,014	0,020	0,027	0,033	0,040	0,046	0,053	0,059	0,066	0,072	0,078
$O''L, мм$	22,4	28,6	34,8	41,0	47,0	53,0	58,7	64,5	69,3	75,8	81,3
$P', Вт$	1681	2148	2610	3075	3525	3975	4403	4838	5198	5683	6095
$\Delta P_m, Вт$	23	43	70	103	141	184	233	286	340	408	475
$P_2, Вт$	1658	2105	2540	2972	3384	3791	4170	4551	4858	5275	5619
$\Delta P_{const}, Вт$	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332
$\Delta P, Вт$	354	375	402	434	472	516	564	618	672	739	807

Будуємо залежність (рис. 2.36) втрат активної потужності в обмотках і втрат активної потужності в цілому в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження, тобто

$$\Delta P_m = f(k_z) \text{ і } \Delta P = f'(k_z).$$

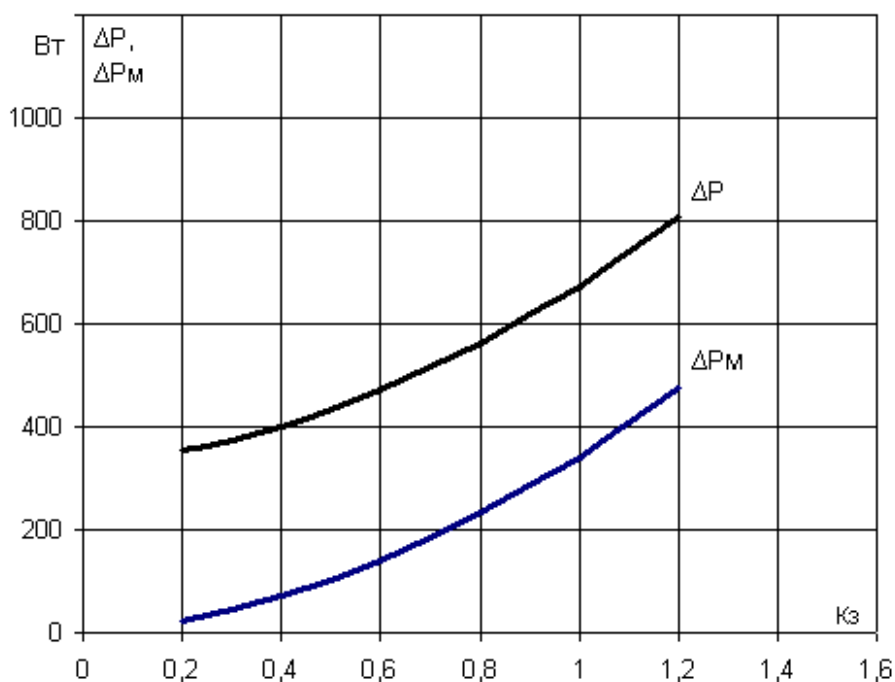


Рис. 2.36. Залежність втрат активної потужності в обмотках і втрат активної потужності в цілому в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження.

Будуємо залежність (рис. 2.37) коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні, тобто

$$\kappa_{\theta} = \frac{\Delta P}{P_2}.$$

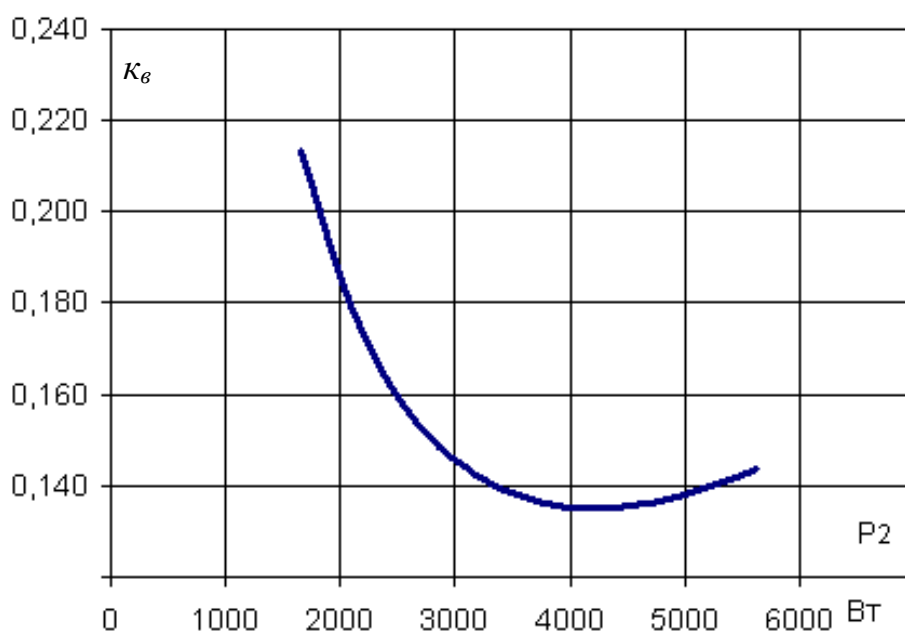


Рис. 2.37. Залежність коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні.

Досліджуємо коефіцієнт втрат активної енергії в електродвигуні, під яким розуміємо відношення втрат активної потужності в електродвигуні до номінальних втрат активної потужності, тобто:

$$\kappa_{ne} = \frac{\Delta P}{\Delta P_n}.$$

Для зазначеного електродвигуна $\Delta P_n = 624 \text{ Вт}$. Розрахуємо значення цього коефіцієнта. Результати заносимо в табл. 2.24.

Таблиця 2.24

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
κ_{ne}	0,57	0,60	0,64	0,70	0,76	0,83	0,90	0,99	1,08	1,18	1,29

Будуємо залежність коефіцієнта втрат активної енергії у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна (рис. 2.38).

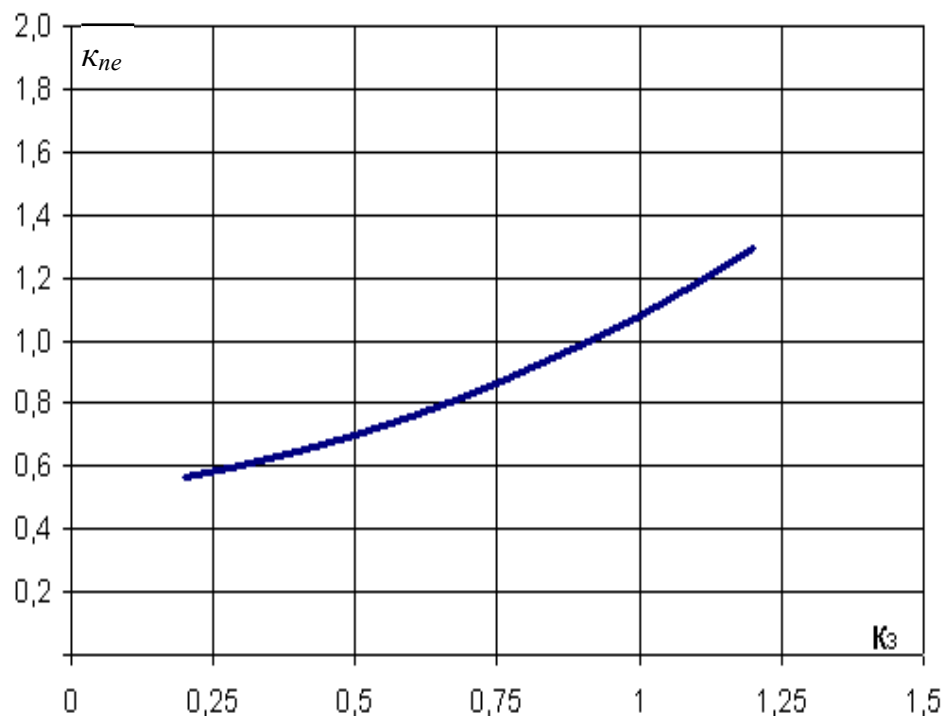


Рис. 2.38. Залежність коефіцієнта втрат активної енергії у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна.

2.5 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції асиметрії напруги й завантаження на валу з боку робочої машини.

У сільськогосподарському виробництві несиметрія напруги визначається, як правило, несиметричним побутовим навантаженням, що носить активний характер. Тому приймаємо з певним допущенням, що напруги по фазах зрушені на кут 120° , а величини напруг відрізняються.

Для умовного ідеального несиметричного генератора можна записати:

$$\dot{E}_A = mE_n; \quad (2.103)$$

$$\dot{E}_B = nE_n e^{-j120^\circ}; \quad (2.104)$$

$$\dot{E}_C = pE_n e^{j120^\circ}, \quad (2.105)$$

де m, n, p – коефіцієнти несиметрії по фазах;

E_n – номінальне значення фазної е.р.с., В.

Коефіцієнти несиметрії дорівнюють відношенню діючого значення е.р.с. фази до номінального значення, тобто

$$m = \frac{E_A}{E_n}; \quad (2.106)$$

$$n = \frac{E_B}{E_n}; \quad (2.107)$$

$$p = \frac{E_C}{E_n}. \quad (2.108)$$

Розкладемо фазні е.р.с. на симетричні складові прямої, зворотної і нульової послідовностей:

$$\dot{E}_1 = \frac{1}{3} (mE_n + nE_n e^{-j120^\circ} e^{j120^\circ} + pE_n e^{j120^\circ} e^{-j120^\circ}) = \frac{E_n}{3} (m + n + p); \quad (2.109)$$

$$\dot{E}_2 = \frac{1}{3} (mE_n + nE_n e^{-j120^\circ} e^{-j120^\circ} + pE_n e^{j120^\circ} e^{j120^\circ}) = \frac{E_n}{3} (m + ne^{-j240^\circ} + pe^{j240^\circ}); \quad (2.110)$$

$$\dot{E}_0 = \frac{1}{3} (mE_n + nE_n e^{-j120^\circ} + pE_n e^{j120^\circ}) = \frac{E_n}{3} (m + ne^{-j120^\circ} + pe^{j120^\circ}). \quad (2.111)$$

Запишемо симетричні складові струмів прямої і зворотної послідовностей електродвигуна:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{R_1 + j(X_1 + X_M)} + \frac{\dot{E}_1/z'}{1 + \frac{R_2''/s}{z'}} e^{j\psi}; \quad (2.112)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{R_1 + j(X_1 + X_M)} + \frac{\dot{E}_2/z'}{1 + \frac{R_2''/(2-s)}{z'}} e^{j\psi}; \quad (2.113)$$

$$\dot{I}_0 = 0. \quad (2.114)$$

Знаходимо сили струмів у фазах електродвигуна:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \quad (2.115)$$

$$\dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \quad (2.116)$$

$$\dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0. \quad (2.117)$$

Знаходимо середньоквадратичне значення сили струму електродвигуна:

$$I = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}} \quad (2.118)$$

Струми прямої й зворотної послідовностей створюють магнітні потоки, які обертаються в протилежні сторони й створюють обертаючий і гальмуючий моменти (рис. 2.39).

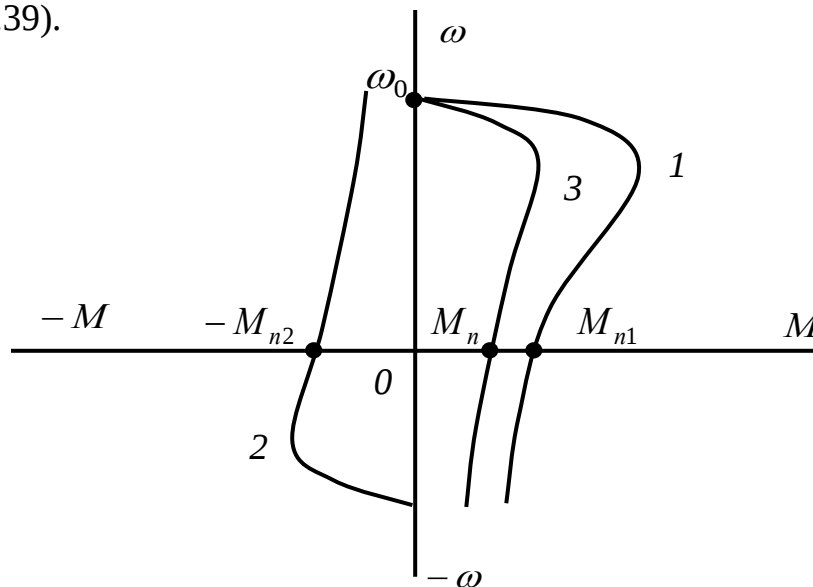


Рис. 2.39. Механічні характеристики електродвигуна: 1 – від дії струмів прямої послідовності; 2 – від дії струмів зворотної послідовності; 3 – результуюча характеристика.

Розглянемо механічні характеристики електродвигуна на робочій ділянці (рис. 2.40).

Лінеаризуємо механічну характеристику, яка створена зворотнім магнітним потоком. З подібних трикутників можна записати:

$$\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{M_2}{M_{n2}}. \quad (2.119)$$

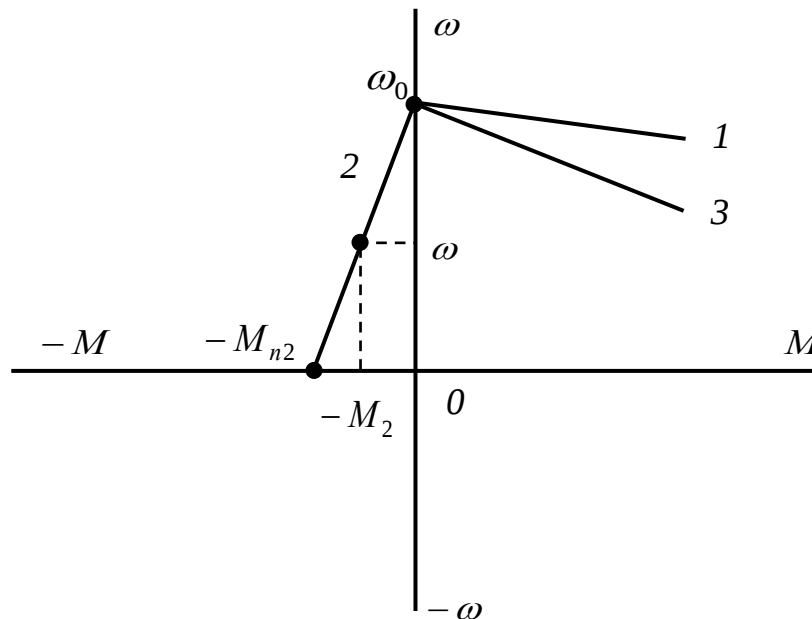


Рис. 2.40. Механічні характеристики електродвигуна на робочій ділянці.

У свою чергу

$$M_{n2} = M_n \left(\frac{U_2}{U_n} \right)^2; \quad (2.120)$$

$$\frac{U_2}{U_n} = \frac{E_2}{E_n}, \quad (2.121)$$

де M_n – пусковий момент електродвигуна, $H \cdot m$;

U_2 – діюче значення напруги симетричної складової зворотної послідовності, B ;

U_n – номінальна фазна напруга, B ;

M_{n2} – пусковий момент, який створюється зворотнім магнітним потоком, $H \cdot m$.

З урахуванням введеного позначення одержуємо вираз зворотного моменту:

$$M_2 = M_n k_{u_2}^2 s, \quad (2.122)$$

Запишемо вираз моменту, який створюється прямим магнітним потоком:

$$M_1 = \frac{s}{s_n} k_{u_1}^2 M_n, \quad (2.123)$$

Знаходимо вираз результуючої механічної характеристики:

$$M = M_1 - M_2 = \left(\frac{k_{u_1}^2 M_n}{s_n} - M_n k_{u_2}^2 \right) s, \quad (2.124)$$

Підставимо (2.122) і (2.123) в (2.124) і одержимо:

$$\left(\frac{k_{u_1}^2 M_n}{s_n} - M_n k_{u_2}^2 \right) s = M_0 + (k_3 M_n - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x, \quad (2.125)$$

Перепишемо (2.125) у відносних одиницях:

$$\left(\frac{k_{u_1}^2}{s_n} - m_n k_{u_2}^2 \right) s = m_0 + (k_3 - m_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x. \quad (2.126)$$

Знаходимо залежність ковзання від кратності напруги прямої і зворотної послідовностей k_{u_1} й k_{u_2} і коефіцієнта завантаження k_3 .

Для приводу робочої машини з незалежною механічною характеристикою ($x=0$) одержуємо:

$$s = \frac{k_3}{k_{u_1}^2 - m_n k_{u_2}^2 s_n} s_n, \quad (2.127)$$

Для приводу робочої машини з лінійно-зростаючою механічною характеристикою ($x=1$) одержуємо:

$$s = \frac{k_3 - m_0 s_n}{(1-s_n) \left(\frac{k_{u_1}^2}{s_n} - m_n k_{u_2}^2 \right) + k_3 - m_0}, \quad (2.128)$$

Для приводу робочої машини з параболічною механічною характеристикою ($x=2$) одержуємо:

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2.129)$$

$$\text{де } a = k_3 - m_0;$$

$$b = -2(k_3 - m_0) - (1 - s_n)^2 \left(\frac{k_{u1}^2}{s_n} - m_n k_{u2}^2 \right);$$

$$c = m_0(1 - s_n)^2 + (k_3 - m_0).$$

Таким чином, при асиметрії напруги ковзання електродвигуна залежить від кратності напруг прямої і зворотної послідовностей k_{u1} і k_{u2} , коефіцієнта завантаження k_3 , кратності пускового моменту m_n , відносного моменту рушання m_0 й номінального ковзання s_n .

Дослідимо варіант асиметричного режиму для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3, прийнявши наступні вихідні дані:

$$m = 0,8;$$

$$n = 0,9;$$

$$p = 1,1;$$

$$E_n = 220B.$$

Розкладемо фазні е.р.с. на симетричні складові прямої, зворотної і нульової послідовностей:

$$\dot{E}_1 = \frac{220}{3} (0,8 + 0,9 + 1,1) = 205,3B,$$

$$\dot{E}_2 = \frac{220}{3} (0,8 + 0,9e^{-j120^\circ} + 1,1e^{j120^\circ}) = -14,66 - j12,46B,$$

$$\dot{E}_0 = \frac{1}{3} (0,8 + 0,9e^{-j120^\circ} + 1,1e^{j120^\circ}) = -14,66 + j12,46B,$$

Перевірка:

$$E_A = 205,3 - 14,66 - j12,46 - 14,66 + j12,46 = 175,98 / 0,8 = 220B.$$

Розраховуємо кратності напруг прямої і зворотної послідовностей:

$$k_{u1} = \frac{E_1}{E_n} = \frac{205,3}{220} = 0,933,$$

$$k_{u2} = \frac{E_2}{E_n} = \frac{19,24}{220} = 0,08.$$

Знаходимо залежність ковзання від кратностей напруг прямої й зворотної послідовностей k_{u1} й k_{u2} і коефіцієнта завантаження k_3 .

Для приводу робочої машини з незалежною механічною характеристикою ($x=0$) одержуємо:

$$s = \frac{k_3}{k_{u1}^2 - m_n k_{u2}^2 s_n} s_n.$$

Таблиця 2.25

k_3	0,4	0,6	0,8	1
s	0,015	0,023	0,030	0,038

Для приводу робочої машини з лінійно-зростаючою механічною характеристикою ($x=1$) одержуємо:

$$s = \frac{k_3 - m_0 s_n}{(1 - s_n) \left(\frac{k_{u1}^2}{s_n} - m_n k_{u2}^2 \right) + k_3 - m_0},$$

Таблиця 2.26

k_3	0,4	0,6	0,8	1
s	0,015	0,023	0,030	0,038

Для приводу робочої машини з параболічною механічною характеристикою ($x=2$) одержуємо:

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

$$\text{де } a = k_3 - m_0;$$

$$b = -2(k_3 - m_0) - (1 - s_n)^2 \left(\frac{k_{u1}^2}{s_n} - m_n k_{u2}^2 \right);$$

$$c = m_0(1 - s_n)^2 + (k_3 - m_0).$$

Таблиця 2.27

k_3	0,4	0,6	0,8	1
s	0,015	0,023	0,030	0,038

2.6 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електро- двигуні при неповнофазному живленні.

При неповнофазному живленні, наприклад, у результаті обриву проводу живлення в колі фази A , розрахункова схема приймає вид, вказаний на рис. 2.41

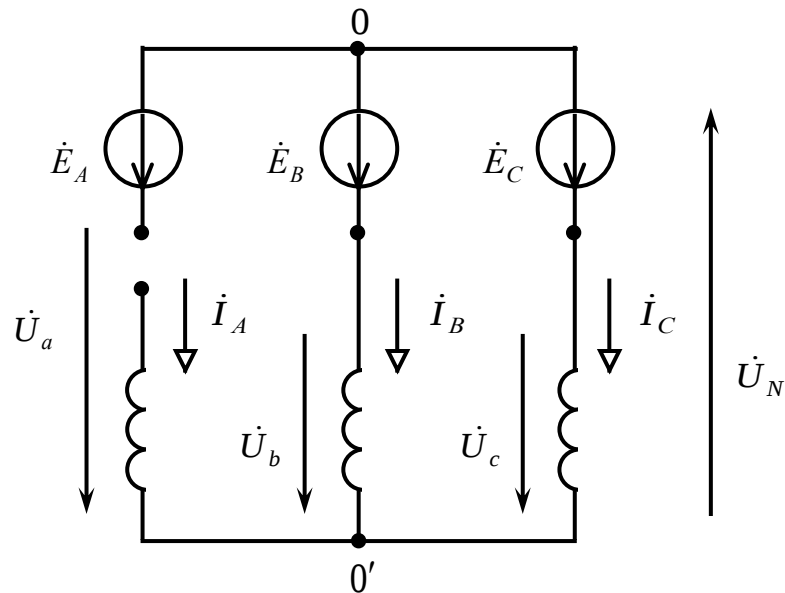


Рис. 2.41. Розрахункова схема кола електродвигуна при обриві в фазі A .

Напруги на фазах електродвигуна, що залишилися в роботі, рівні:

$$\dot{U}_b = \dot{E}_B - \dot{U}_N; \quad (2.130)$$

$$\dot{U}_c = \dot{E}_C - \dot{U}_N; \quad (2.131)$$

де $\dot{U}_N$ – напруга зсуву нейтралі, B .

Знайдемо напругу зсуву нейтралі:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \quad (2.132)$$

$$\text{де } \dot{E}_A = E_H; \quad (2.133)$$

$$\dot{E}_B = E_H e^{-j120^\circ}; \quad (2.134)$$

$$\dot{E}_C = E_H e^{j120^\circ}; \quad (2.135)$$

$$Y_A = 0; \quad (2.136)$$

$$Y_B = Y_C = Y. \quad (2.137)$$

Тоді

$$\dot{U}_N = -0,5\dot{E}_A = -0,5\dot{E}_H. \quad (2.138)$$

Знаходимо напруги на фазах, що залишилися в роботі:

$$\dot{U}_b = \dot{E}_B + 0,5\dot{E}_A; \quad (2.139)$$

$$\dot{U}_c = \dot{E}_C + 0,5\dot{E}_A; \quad (2.140)$$

Після перетворень одержуємо:

$$\dot{U}_b = -j\frac{\sqrt{3}}{2}E_H; \quad (2.141)$$

$$\dot{U}_c = j\frac{\sqrt{3}}{2}E_H; \quad (2.142)$$

Напруга в розриві кола:

$$\dot{U}_a = \dot{E}_A + 0,5\dot{E}_A = 1,5E_H; \quad (2.143)$$

Знаходимо струми у фазах, що залишилися в роботі:

$$\dot{I}_A = 0; \quad (2.144)$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{R_1 + j(X_1 + X_M)} + \frac{\dot{U}_b/z'}{1 + \frac{R_2''/s}{z'} e^{j\psi}}; \quad (2.145)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{R_1 + j(X_1 + X_M)} + \frac{\dot{U}_c/z'}{1 + \frac{R_2''/s}{z'} e^{j\psi}}; \quad (2.146)$$

Знаходимо симетричні складові напруг прямої і зворотної послідовностей на фазах, що залишилися в роботі:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3} \left(-j \frac{\sqrt{3}}{2} E_n e^{j120^\circ} + j \frac{\sqrt{3}}{2} E_n e^{-j120^\circ} \right) = \frac{\sqrt{3} E_n}{6} (e^{j30^\circ} + e^{-j30^\circ}) = \frac{E_n}{2}; \quad (2.147)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} \left(-j \frac{\sqrt{3}}{2} E_n e^{-j120^\circ} + j \frac{\sqrt{3}}{2} E_n e^{j120^\circ} \right) = \frac{\sqrt{3} E_n}{6} (e^{-j210^\circ} + e^{j210^\circ}) = -\frac{E_n}{2}; \quad (2.148)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} \left(-j \frac{\sqrt{3}}{2} E_n + j \frac{\sqrt{3}}{2} E_n \right) = 0. \quad (2.149)$$

Під дією симетричних складових напруг протікають симетричні складові струмів прямої і зворотної послідовностей, які створюють прямі й зворотні обертові магнітні поля. Їм відповідають механічні характеристики (рис. 2.42)

Ковзання електродвигуна в цьому випадку знаходимо за формулами (2.127), (2.128), (2.129).

Так як кратності напруг симетричних складових прямої і зворотної послідовностей рівні між собою, то в порівнянні з несиметричним повнофазним режимом цей режим є більш важким: результуючий пусковий момент дорівнює нулю, ковзання при тих самих умовах більше.

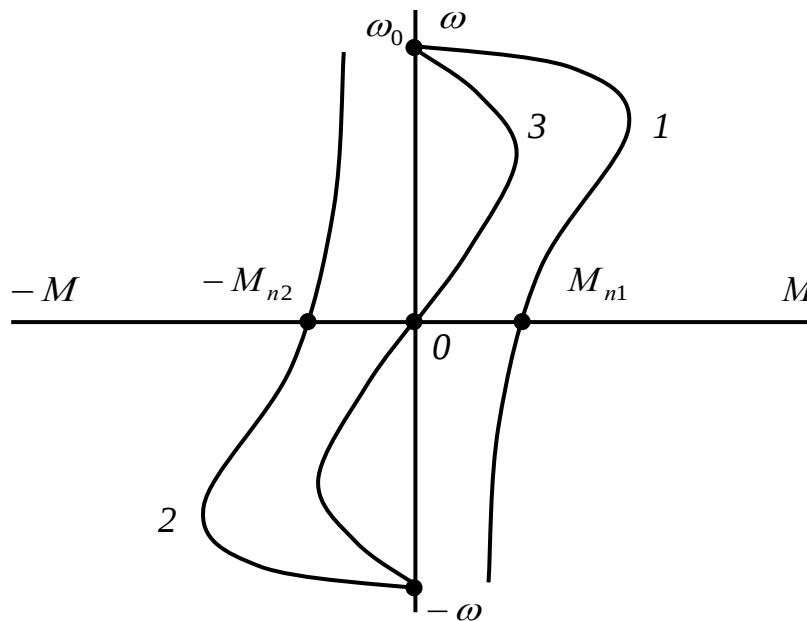


Рис. 2.42. Механічні характеристики асинхронного електродвигуна при неповнофазному живленні: 1 – від дії струмів прямої послідовності; 2 – від дії струмів зворотної послідовності; 3 – результуюча механічна характеристика.

Знаходимо симетричні складові напруг прямої і зворотної послідовностей на фазах, що залишилися в роботі:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \frac{1}{3} \left(-j \frac{\sqrt{3}}{2} 220 e^{j120^\circ} + j \frac{\sqrt{3}}{2} 220 e^{-j120^\circ} \right) = \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{6} (e^{j30^\circ} + e^{-j30^\circ}) = \frac{220}{2} = 110V; \\ \dot{U}_2 &= \frac{1}{3} \left(-j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 220 e^{-j120^\circ} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 220 e^{j120^\circ} \right) = \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{6} (e^{-j210^\circ} + e^{j210^\circ}) = -\frac{220}{2} = -110V; \\ \dot{U}_0 &= \frac{1}{3} \left(-j \frac{\sqrt{3}}{2} E_H + j \frac{\sqrt{3}}{2} E_H \right) = 0.\end{aligned}$$

Розраховуємо кратності напруг прямої і зворотної послідовностей:

$$k_{u1} = k_{u2} = \frac{U_1}{U_H} = \frac{U_2}{U_H} = \frac{110}{220} = 0,5.$$

Знаходимо залежність ковзання від кратностей напруг прямої й зворотної послідовностей k_{u1} , k_{u2} і коефіцієнта завантаження k_3 .

Для приводу робочої машини з незалежною механічною характеристикою ($x=0$) одержуємо:

$$s = \frac{k_3}{k_{u1}^2 - m_n k_{u2}^2 s_H} s_H.$$

Таблиця 2.28

k_3	0,4	0,6	0,8	1
s	0,053	0,080	0,106	0,133

Для приводу робочої машини з лінійно-зростаючою механічною характеристикою ($x=1$) одержуємо:

$$s = \frac{k_3 - m_0 s_H}{(1 - s_H) \left(\frac{k_{u1}^2}{s_H} - m_n k_{u2}^2 \right) + k_3 - m_0},$$

Таблиця 2.29

k_3	0,4	0,6	0,8	1
s	0,053	0,080	0,106	0,133

Для приводу робочої машини з параболічною механічною характеристикою ($x = 2$) одержуємо:

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

$$\text{де } a = k_3 - m_0;$$

$$b = -2(k_3 - m_0) - (1 - s_n)^2 \left(\frac{k_{u1}^2}{s_n} - m_n k_{u2}^2 \right);$$

$$c = m_0(1 - s_n)^2 + (k_3 - m_0).$$

Таблиця 2.30

k_3	0,4	0,6	0,8	1
s	0,053	0,080	0,106	0,133

2.7 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції температури навколишнього середовища й навантаження на валу з боку робочої машини.

Стале перевищення температури обмотки асинхронного електродвигуна спрощено може бути знайдено в такий спосіб:

$$\tau_y = \frac{\Delta P_{c.n} + \kappa^2 \Delta P_{m.n}}{A}, \quad (2.150)$$

де $\Delta P_{c.n}$ – розрахункові постійні втрати активної потужності (втрати в сталі) у номінальному режимі роботи, Вт;

$\Delta P_{m.n}$ – розрахункові змінні втрати активної потужності в провідниках (втрати в міді) у номінальному режимі роботи, Вт;

κ – кратність сили струму навантаження відносно номінальної сили струму, A ;

A – тепловіддача електродвигуна, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$.

За розрахункову температуру ізоляції класу В прийнято температуру $\vartheta_p = 75^\circ\text{C}$, класу F – $\vartheta_p = 115^\circ\text{C}$. Ізоляція класу В при номінальному навантаженні електродвигуна ($\kappa = 1$) буде мати перевищення температури, рівне довгостро-

ково припустимому, тобто 90°C , лише при температурі середовища $\vartheta_{cp} = -15^{\circ}\text{C}$; ізоляція класу F при номінальному навантаженні електродвигуна буде мати перевищення температури, рівне довгостроково припустимому, тобто 115°C , лише при температурі навколишнього середовища $\vartheta_{cp} = 0^{\circ}\text{C}$, тому що тільки в цьому випадку втрати потужності в провідниках будуть дорівнюють розрахунковим втратам $\Delta P_{м.н.}$. При інших значеннях температури навколишнього середовища, а отже й температури провідників, втрати потужності в останніх при номінальному навантаженні будуть рівні.

$$\Delta P'_{м.н.} = \Delta P_{м.н.} (1 + \alpha(\tau_y + \vartheta_{cp} - \vartheta_p)), \quad (2.151)$$

де ϑ_{cp} – температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$;

ϑ_p – розрахункова температура провідників, $^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 2.31

κ_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
$P_2, \text{Вт}$	414	832	1235	1764	2142	2519	2873	3345	4019	4058	4418
$\Delta P, \text{Вт}$	281	294	313	347	382	417,8	460,7	522	604,6	641,3	716
$P_1, \text{Вт}$	695	1126	1548	2111	2524	2936,8	3333,7	3867	4623,6	4699,3	5134
$\cos \varphi,$ <i>в.о.</i>	0,56	0,64	0,73	0,8	0,83	0,85	0,867	0,877	0,89	0,895	0,9
$\eta, \text{в.о.}$	0,78	0,812	0,84	0,86	0,87	0,88	0,88	0,873	0,865	0,86	0,853
$S_1, \text{ВА}$	1241	1759	2121	2639	3041	3455	3845	4409	5195	5251	5704
$I, \text{А}$	1,44	2,43	3,05	3,88	4,48	5,10	5,71	6,62	7,91	7,99	8,72
k	0,18	0,31	0,39	0,49	0,57	0,65	0,72	0,84	1,01	1,02	1,11

Розраховуємо залежність сталого перевищення температури електродвигуна у функції кратності сили струму навантаження відносно номінальної сили струму.

$$\tau_y = f(\kappa).$$

Результати розрахунку заносимо в табл. 2.32.

Таблиця 2.32

k	0,18	0,31	0,39	0,49	0,57	0,65	0,72	0,84	1,01	1,02	1,11
$\tau_y, ^\circ\text{C}$	39,4	42,2	44,8	49,0	52,7	57,1	61,9	70,2	84,1	85,0	94,0

На підставі отриманих даних будуюмо залежність сталого перевищення температури електродвигуна у функції кратності сили струму навантаження відносно номінальної сили струму (рис. 2.43).

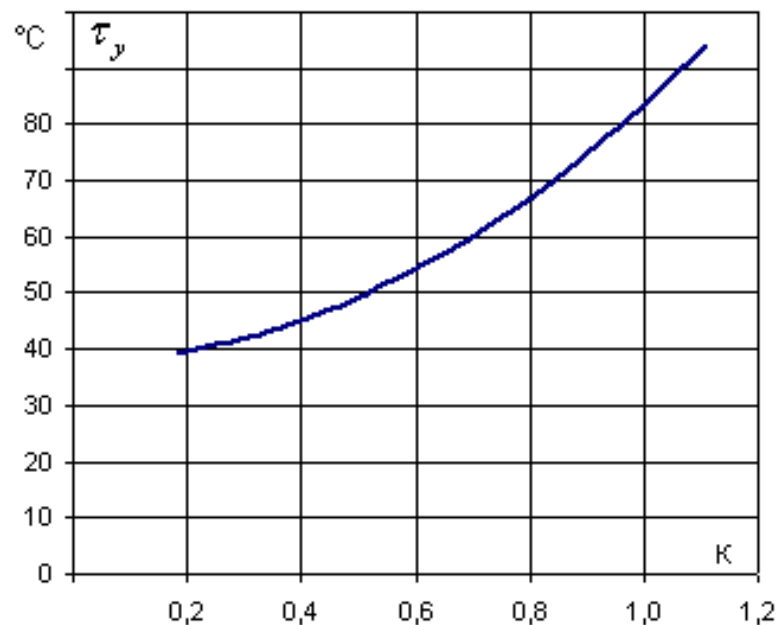


Рис. 2.43. Залежність сталого перевищення температури електродвигуна у функції кратності сили струму навантаження відносно номінальної сили струму.

Розраховуємо залежність втрат активної потужності при номінальному навантаженні у функції температури навколишнього середовища.

$$\Delta P'_{\text{м.н.}} = f(\vartheta_{\text{ср.}})$$

Результати розрахунку заносимо в табл. 2.33.

Таблиця 2.33

$\vartheta_{\text{ср.}}, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40
$\Delta P'_{\text{м.н.}}, \text{Вт}$	355,2	368,4	381,6	394,9

На підставі отриманих даних будуюмо залежність втрат активної потужності при номінальному навантаженні у функції температури навколишнього середовища (рис. 2.44).

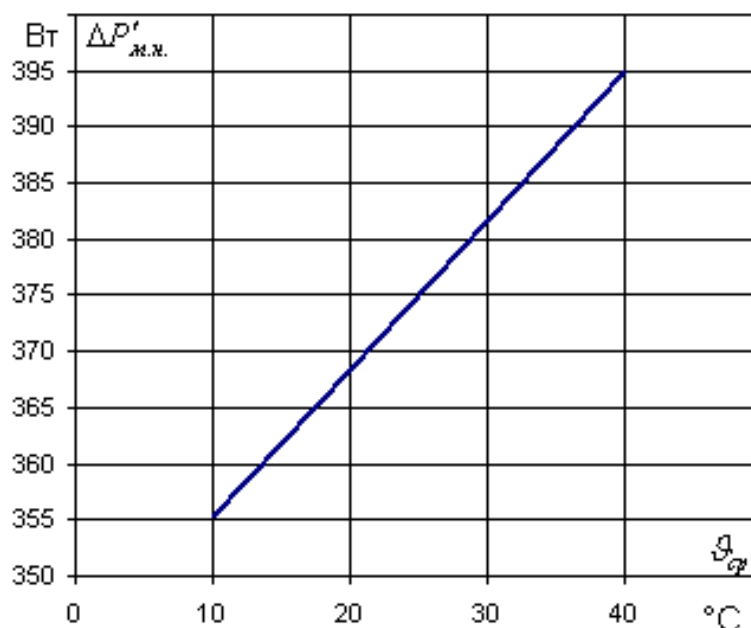


Рис. 2.44. Залежність втрат активної потужності при номінальному навантаженні у функції температури навколишнього середовища.

2.8 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у квазісталому режимі.

Як правило, навантаження електричних двигунів не є постійним й визначається технологічними режимами. Найчастіше воно носить циклічний характер. Тому становить інтерес дослідження теплового перехідного процесу електродвигуна при циклічному навантаженні у квазісталому режимі. Навантаження електродвигуна будемо задавати у вигляді графіка, якому буде відповідати графік теплового навантаження, наприклад, наведений на рис. 2.30. При роботі електродвигуна із циклічним навантаженням через певну кількість циклів практично настає квазісталий режим, при якому

$$\tau_0 = \tau_n, \quad (2.152)$$

Для розрахунку теплового перехідного процесу необхідно визначити перевищення температури на початку циклу τ_0 , яке дорівнює перевищенню температури наприкінці циклу τ_n . Приймаємо $t_1 = t_2 = t_3 = t_i$. Тоді можемо записати систему рівнянь

$$\tau_1 = \tau_{1y} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_3 e^{-\frac{t_i}{T}}; \quad (2.153)$$

$$\tau_2 = \tau_{2y} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_1 e^{-\frac{t_i}{T}}; \quad (2.154)$$

$$\tau_3 = \tau_{3y} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_2 e^{-\frac{t_i}{T}}. \quad (2.155)$$

де T – еквівалентна постійна часу нагрівання електродвигуна, $^{\circ}\text{C}$;

$\tau_{1y}, \tau_{2y}, \tau_{3y}$ – сталі перевищення температури для кожної ділянки, $^{\circ}\text{C}$.

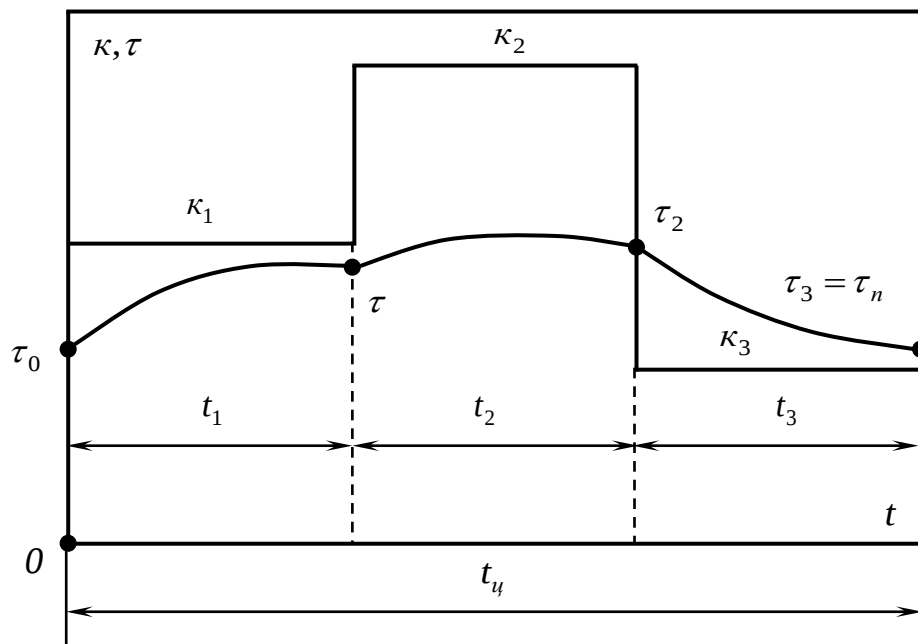


Рис. 2.45. Графіки струмів і теплового навантаження обмотки електродвигуна при циклічному режимі роботи в квазісталому стані.

Введемо позначення $b = e^{-\frac{t_i}{T}}$ й перепишемо рівняння у вигляді

$$\tau_1 - b\tau_3 = (1-b)\tau_{1y}; \quad (2.156)$$

$$-b\tau_1 + \tau_2 = (1-b)\tau_{2y}; \quad (2.157)$$

$$-b\tau_2 + \tau_3 = (1-b)\tau_{3y}. \quad (2.158)$$

Вирішивши цю систему рівнянь відносно τ_1, τ_2, τ_3 , одержимо

$$\tau_1 = \frac{1-b}{1-b^3}(\tau_{1y} + b^2\tau_{2y} + b\tau_{3y}), \quad (2.159)$$

$$\tau_2 = \frac{1-b}{1-b^3}(\tau_{2y} + b^2\tau_{3y} + b\tau_{1y}), \quad (2.160)$$

$$\tau_3 = \frac{1-b}{1-b^3}(\tau_{3y} + b^2\tau_{1y} + b\tau_{2y}). \quad (2.161)$$

Аналогічно (2.161) можна записати вираз для розрахунку перевищення температури наприкінці циклу при n рівних ділянок графіка

$$\tau_n = \frac{1-b}{1-b^n}(b^{n-1}\tau_{1y} + b^{n-2}\tau_{2y} + b^{n-3}\tau_{3y} + \dots + b^{n-n}\tau_{ny}), \quad (2.162)$$

Таким чином, можемо записати

$$\tau_0 = \frac{1-b}{1-b^n} \sum_{i=1}^n b^{n-i} \tau_{iy}, \quad (2.163)$$

$$\text{де } i=1,2,3,\dots,n, \quad (2.164)$$

Знайдемо ще один зв'язок, просумувавши рівняння (2.159), (2.160) і (2.161)

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = \frac{1-b}{1-b^3}(\tau_{1y} + \tau_{2y} + \tau_{3y})(1+b+b^2), \quad (2.165)$$

Після перетворення одержуємо

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = \tau_{1y} + \tau_{2y} + \tau_{3y}, \quad (2.166)$$

Очевидно, що якщо графік має n рівних ділянок, справедливий вираз

$$\sum_{i=1}^n \tau_i = \sum_{i=1}^n \tau_{iy}, \quad (2.167)$$

2.9 Висновки

1. Аналіз отриманої залежності коефіцієнта втрат активної потужності електродвигуна у функції активної потужності на його валу з урахуванням росту активного опору обмоток при нагріванні (рис. 2.3) показує, що вона носить екстремальний характер і з її допомогою можна оптимізувати завантаження електродвигуна, домагаючись мінімуму втрат активної потужності в електродвигуні на одиницю корисної активної потужності.

2. Отримане рівняння кругової діаграми комплексу повної потужності асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором (рис. 2.7) у функції ковзання електродвигуна при різних кратностях прикладеної напруги дозволяє визначити втрати активної потужності при заданому коефіцієнті завантаження робочої машини.

3. Наведемо зведені залежності втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження робочої машини при різних кратностях прикладеної напруги, отриманих на підставі досліджень у пункті 2.4 (рис. 2.46).

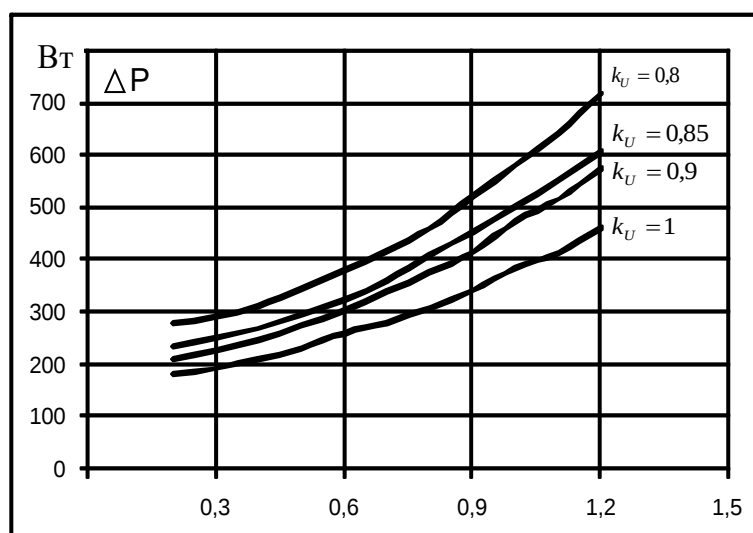


Рис. 2.46. Зведені залежності втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження робочої машини при різних кратностях прикладеної напруги.

Аналіз залежностей, наведених на рис. 2.46, показує, що, знаючи коефіцієнт завантаження робочої машини, регулюючи величину прикладеної напруги, можливо створити систему мінімізації втрат активної потужності в електродвигуні

4. Наведемо зведені залежності втрат активної потужності в обмотках електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження робочої машини при різних кратностях прикладеної напруги, отриманих на підставі досліджень у пункті 2.47 (рис. 2.47).

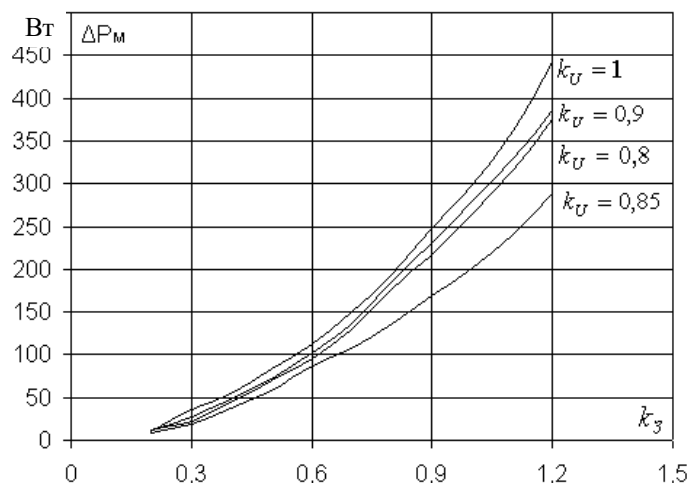


Рис. 2.47. Зведені залежності втрат активної потужності в обмотках електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження робочої машини при різних кратностях прикладеної напруги.

Аналіз залежностей, наведених на рис. 2. 47, також показує, що , знаючи коефіцієнт завантаження робочої машини, регулюючи величину прикладеної напруги, можливо створити систему мінімізації втрат активної потужності в електродвигуні.

5. Наведемо зведені залежності постійних втрат активної потужності в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження робочої машини при різних кратностях прикладеної напруги, отриманих на підставі досліджень у пункті 2.4 (рис. 2.48).

Аналіз залежностей, наведених на рис. 2.48, також показує, що , знаючи коефіцієнт завантаження робочої машини, регулюючи величину прикладеної напруги, можливо створити систему мінімізації втрат активної потужності в електродвигуні.

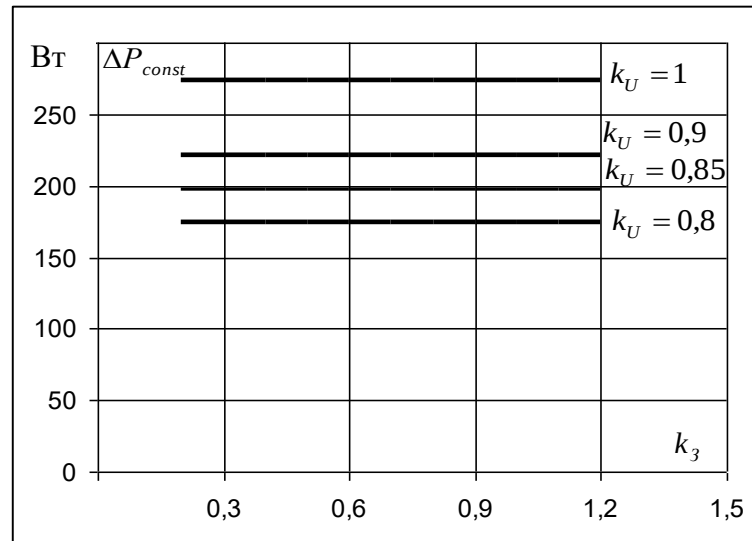


Рис. 2.48. Зведені залежності постійних втрат активної потужності в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження робочої машини при різних кратностях прикладеної напруги.

6. Наведемо зведені залежності коефіцієнта перетворення активної енергії в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження робочої машини при різних кратностях прикладеної напруги, отриманих на підставі досліджень у пункті 2.4 (рис. 2.34).

Аналіз залежностей, наведених на рис. 2.49, показує, що, знаючи коефіцієнт завантаження робочої машини, задавшись значенням коефіцієнта перетворення активної енергії, можна визначити необхідну кратність прикладеної напруги.

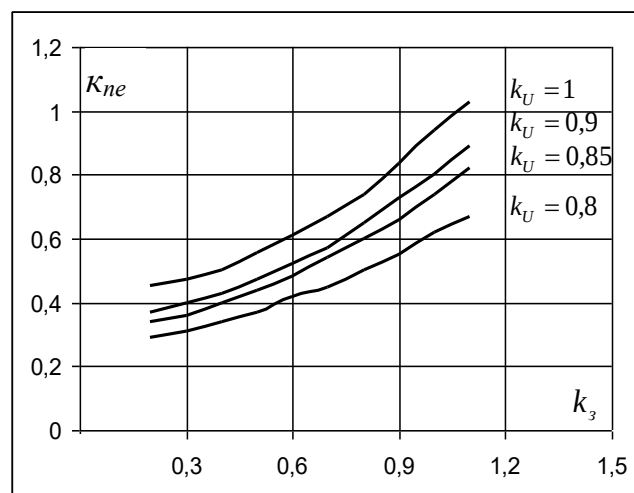


Рис.2.49. Зведені залежності коефіцієнта перетворення активної енергії в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження робочої машини при різних кратностях прикладеної напруги.

7. Аналіз результатів, отриманих у пункті 2.5 при асиметрії напруги живлення, показує, що при заданій асиметрії напруги живлення можливо визначити коефіцієнт перетворення активної енергії й, якщо його величина перевищує одиницю, то це буде говорити про те, що режим роботи електродвигуна аномальний і потребує прийняття рішень по його нормалізації.

8. Аналіз результатів, отриманих у пункті 2.6 при неповнофазному живленні асинхронного електродвигуна, показує, що за допомогою отриманих виразів можливо розрахувати коефіцієнт завантаження робочої машини, при якому режим роботи електродвигуна з погляду втрат активної потужності не виходить за межі нормального.

РОЗДІЛ 3.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТИ РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА.

3.1. Закономірності теплового старіння ізоляції електричних машин

Серед різних факторів, що визначають термін служби ізоляції електричних машин, одним з основних є теплове старіння. При аналізі експлуатаційних режимів особливого значення набувають методи розрахунку швидкості теплового старіння електричної ізоляції й визначення строку її служби.

Перші роботи в цьому напрямку мали переважно експериментальний характер і відносилися головним чином до ізоляції класу А. У результаті було сформульовано так зване правило «восьми градусів», відповідно до якого підвищення температури ізоляції на кожні вісім градусів скорочує строк її служби вдвічі [1]. Аналітично це правило виражається у вигляді рівняння

$$D = D_0 \cdot e^{-0,0866\vartheta} \quad (3.1)$$

де D_0 – термін служби ізоляції при температурі 0°C , год;

ϑ – температура ізоляції, $^\circ\text{C}$.

Правило «восьми градусів» внаслідок своєї простоти знаходить широке застосування й дозволяє робити орієнтовні розрахунки в тих випадках, коли вони відносяться до порівняно невеликих діапазонів зміни температури. Недоліком рівняння (3.1) є його емпіричний і формальний характер, що вносить невизначеність у значення числових постійних і не дозволяє розраховувати на одержання цим методом досить надійних результатів.

Більш строгий підхід до дослідження явищ старіння ізоляції полягає в застосуванні до них загальних законів кінетики хімічних реакцій. Вант Гоффом і Арреніусом була знайдена залежність швидкості хімічних реакцій від температури:

$$\ln K = \frac{B}{\theta} + A, \quad (3.2)$$

де K – постійна швидкості реакції;

θ – абсолютна температура, К;

B – критерій ізоляції, К;

A – постійний коефіцієнт;

$$\frac{dC}{dt} = KC, \quad (3.3)$$

де C – концентрація непрореагувавших молекул у розглянутий момент часу t ;

$$K = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C}, \quad (3.4)$$

де C_0 – початкова концентрація непрореагувавших молекул;

$$A = \ln(PZ), \quad (3.5)$$

$$P = e^{\frac{\Delta S}{R}}, \quad (3.6)$$

$$B = -\frac{E_a}{R}, \quad (3.7)$$

де Z - число зіткнень між реагуючими молекулами в одиницю часу ;

P - фактор імовірності належної орієнтації молекул при зіткненні;

ΔS - ентропія активації – величина, що характеризує частку загального числа зіткнень, при яких молекули орієнтовані належним чином;

R – універсальна газова постійна, $R=8,317, \frac{\text{Дж}}{\text{град} \cdot \text{моль}}$;

E_a – енергія активації, тобто надлишкова (у порівнянні із середньою величиною) кількість енергії, якою повинна володіти молекула, щоб перебороти енергетичний бар'єр і виявитися здатної до даної хімічної взаємодії.

Поеднуючи наведені вище рівняння, можна одержати рівняння Вант Гоффа-Арреніуса:

$$K = Ae^{-\frac{E_a}{R\theta}}, \quad (3.8)$$

Значення B для різних ізоляційних матеріалів (визначаються експериментально) табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Клас ізоляції	В, К	θ_n , К	D_n , бгод	G
А	9500	378	20000	15,3
Е	9850	393	20000	1,1
В	10200	403	20000	1,5
Г	12700	428	20000	1,7

Вирішуючи спільно рівняння (3.4) і (3.8) і позначаючи термін служби ізоляції через D , одержимо:

$$D = e^{\frac{E_a}{R\theta} - G}, \quad (3.9)$$

де

$$G = \ln A - \ln \ln \frac{C_0}{C}, \quad (3.10)$$

Знаючи термін служби ізоляції D_n , при температурі θ_n , можна знайти термін служби ізоляції D , при температурі θ :

$$D = D_n e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta}\right)}, \quad (3.11)$$

Знайдемо швидкість теплового зношення ізоляції (у базових годинниках за годину) при заданій її температурі:

$$\varepsilon = \frac{D_n}{D}, \quad (3.12)$$

де D_n – базовий ресурс ізоляції, бгод;

D – термін служби ізоляції при температурі θ , год.

Підставивши значення D у (3.11) одержимо:

$$\varepsilon = e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta}\right)}. \quad (3.13)$$

3.2 Аналіз впливу графіка навантаження на процес теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна.

В якості об'єкта дослідження приймаємо електродвигун типу 4A100S2У3.

Паспортні дані електродвигуна:

$$P_{2n} = 4 \text{ кВт}; \quad \eta_n = 0,865; \quad \cos \varphi_n = 0,89;$$

Параметри схеми заміщення:

$$R_1' = 1,509 \text{ Ом}; \quad x_1' = 1,537 \text{ Ом}; \quad R_2'' = 1,006 \text{ Ом}; \quad x_2'' = 2,767 \text{ Ом};$$

Клас нагрівостійкості системи ізоляції – В;

Номінальна фазна напруга $U_n = 220 \text{ В};$

Номінальне ковзання $s_n = 0,033;$

Кратність пускового моменту $m_n = 2,0;$

Кратність критичного моменту $m_k = 2,5;$

Кратність мінімального моменту $m_m = 1,6;$

Кратність пускового струму $k_n = 7,5;$

Критичне ковзання $s_k = 0,28.$

Маса міді $m_1 = 2,9 \text{ кг};$

Маса сталі $m_2 = 35,3 \text{ кг};$

Перевищення температури міді над температурою навколишнього середовища в номінальному режимі роботи $\tau_{1n} = 90^\circ \text{C};$

Перевищення температури сталі над температурою навколишнього середовища в номінальному режимі роботи $\tau_{2n} = 70^\circ \text{C};$

Втрати активної потужності в електродвигуні в номінальному режимі роботи $\Delta P_n = 624 \text{ Вт}.$

Теплоємність міді електродвигуна $C_1 = 9900 \text{ Дж/}^\circ \text{C};$

Теплоємність сталі електродвигуна $C_2 = 1137000 \text{ Дж/}^\circ \text{C};$

Еквівалентна постійна часу нагрівання електродвигуна

$$T = 1840 \text{ с}.$$

Задамося графіком навантаження (табл. 3.2) і визначимо теплове зношення ізоляції за 1 годину роботи у квазісталому режимі. Приймаємо температуру навколишнього середовища ϑ_{cp} рівною 30°C . Потім зробимо перестановку черговості проходження навантаження за часом так, як це показано на рисунках 3.1; 3.2; 3.3; 3.4. Крім того, визначимо теплове зношення ізоляції, замінивши реальний графік середньоквадратичним значенням навантаження (рис. 3.5).

Графік навантаження для визначення теплового зношення ізоляції.

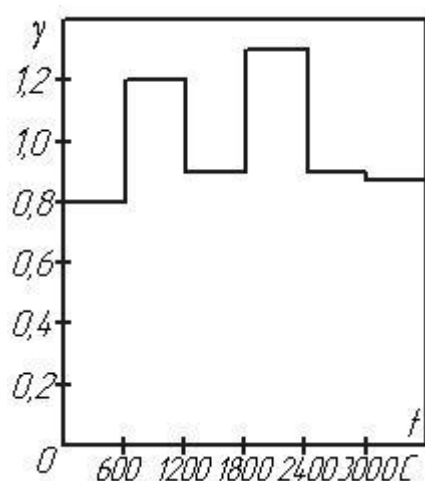


Рис. 3.1. Графік навантаження №1

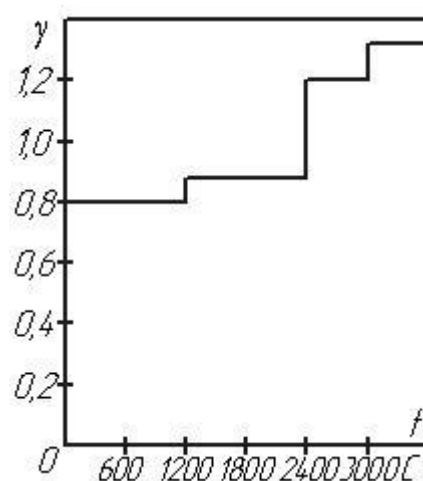


Рис. 3.2. Графік навантаження №2

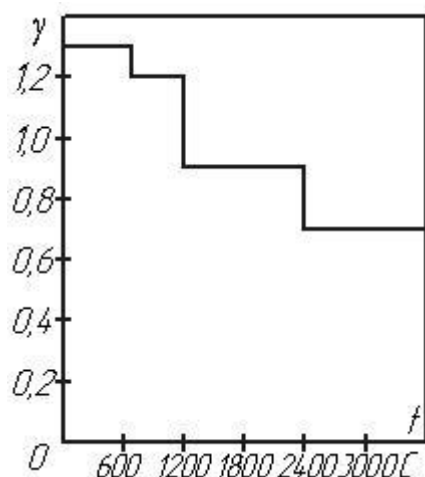


Рис. 3.3. Графік навантаження №3

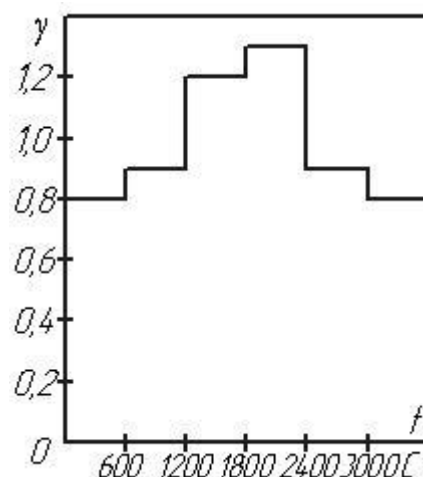


Рис. 3.4. Графік навантаження №4

Таблиця 3.2

t, c	κ
0-200	0,8
200-400	0,8
400-600	0,8
600-800	1,2
800-1000	1,2
1000-1200	1,2
1200-1400	0,9
1400-1600	0,9
1600-1800	0,9
1800-2000	1,3
2000-2200	1,3
2200-2400	1,3
2400-2600	0,9
2600-2800	0,9
2800-3000	0,9
3000-3200	0,8
3200-3400	0,8
3400-3600	0,8

Встановлюємо наступний алгоритм визначення теплового зношення ізоляції. Визначаємо перевищення температури обмотки на початку циклу:

$$\tau_0 = \frac{1-b}{1-b^n} \sum_{i=1}^n b^{n-i} \tau_{iy}, \quad (3.14)$$

де $i=1,2,3,\dots,n$.

Стале перевищення температури обмотки на i -ій ділянці графіка визначаємо за формулою:

$$\tau_{iy} = \tau_n \frac{a + \kappa_i^2}{a + 1 - \alpha \tau_n (\kappa_i^2 - 1)}. \quad (3.15)$$

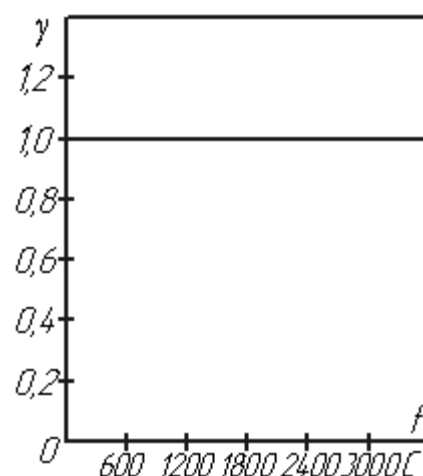


Рис. 3.5. Графік середньоквадратичне значенням навантаження.

Коефіцієнт втрат активної потужності визначаємо наступним чином:

$$a = \frac{\Delta P_{const.H}}{\Delta P_{var.H}}. \quad (3.16)$$

Змінні втрати при номінальному режимі роботи визначаємо за (3.17) і (3.18):

$$\Delta P_{var.H} = 3(R'_1 + R''_2)I'^2_H, \quad (3.17)$$

$$I'^2_H = \frac{U^2_H}{(R'_1 + R''_2/s)^2 + (x'_1 + x''_2)^2}, \quad (3.18)$$

Постійні втрати при номінальному режимі роботи визначаємо за (3.19) і (3.20):

$$\Delta P_{const.H} = \Delta P_H - \Delta P_{var.H}, \quad (3.19)$$

$$\Delta P_H = \frac{P_{2H}}{\eta_H} - P_{2H}. \quad (3.20)$$

Квадрат кратності струму навантаження електродвигуна на i -ій ділянці графіка визначаємо за (3.21):

$$k_i^2 = \frac{(R'_1 + R''_2/s_i)^2 + (x'_1 + x''_2)^2}{(R'_1 + R''_2/s_i)^2 + (x'_1 + x''_2)^2}. \quad (3.21)$$

Перевищення температури наприкінці i -ої ділянки графіка визначаємо за (3.22):

$$\tau_i = \tau_{iy} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_{i-1} e^{-\frac{t_i}{T}}. \quad (3.22)$$

Теплове зношення ізоляції обмотки асинхронного електродвигуна на i -ій ділянці визначаємо як $\int \varepsilon_i dt$ з урахуванням (3.22):

$$E_i = \int_0^{t_i} e^B \left(\frac{1}{\theta_H} - \frac{1}{\tau_{iy}(1 - e^{-t/T}) + \tau_i e^{-t/T} + \theta_{cp} + 273} \right) dt. \quad (3.23)$$

Сумарне теплове зношення ізоляції асинхронного електродвигуна за цикл роботи визначаємо в такий спосіб:

$$E_y = \sum_1^n E_i, \quad (3.24)$$

Теплове зношення ізоляції за 1 годину роботи асинхронного електродвигуна за графіком навантаження у квазісталому режимі визначаємо в такий спосіб:

$$E = \frac{3600}{n \cdot t_i} E_{\text{ц}}. \quad (3.25)$$

Результати дослідження впливу графіка навантаження на процес теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Температура навколишнього середовища, °C	Теплове зношення ізоляції в базових годинах для графіків навантаження				
	№1	№2	№3	№4	№5
30	0,63	0,66	0,65	0,67	0,53

На підставі результатів проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

- вплив графіка навантаження на процес теплового зношення ізоляції відбувається шляхом формування графіка теплового процесу обмоток, що визначає середню швидкість теплового зношення ізоляції за один цикл роботи електродвигуна;

- форма графіка навантаження практично не впливає на сумарне теплове зношення ізоляції за цикл роботи (розбіжність становить 3-6 %);

- заміна реального графіка навантаження асинхронного електродвигуна середньоквадратичним значенням навантаження приводить до заниженого значення (на 16 – 22 %) теплового зношення ізоляції проти теплового зношення при реальному графіку навантаження; тому оцінка завантаження асинхронного електродвигуна за середньоквадратичним значенням споживаного струму не має необхідної точності.

3.3 Дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна у функції завантаження на валу з боку робочої машини.

Витрата ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна пов'язана з режимом роботи останнього й визначається тепловим зношенням ізоляції.

Відомо, що швидкість теплового зношення ізоляції показує, скільки базових (з 20000) годин витрачається за одну годину роботи електродвигуна й розраховується за виразом:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_n e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta_c} \right)} \quad (3.26)$$

де $\mathcal{E}$ - швидкість теплового зношення ізоляції, год / год;

$\mathcal{E}_n$ - номінальна швидкість теплового зношення ізоляції, год / год;

θ_n - абсолютна номінальна температура ізоляції даного класу, К;

θ_c - фактична абсолютна стала температура ізоляції, К;

B – показник, що характеризує ізоляцію даного класу, К.

У свою чергу, стале перевищення температури ізоляції електродвигуна й абсолютна стала температура ізоляції залежать від кратності сили електричного струму, який споживає електродвигун:

$$\tau_y = \tau_n \frac{a + \kappa^2}{a + 1} \quad (3.27)$$

де τ_n - номінальне перевищення температури ізоляції даного класу, °С;

a – коефіцієнт втрат (відношення номінальних втрат у сталі до номінальних втрат у міді);

κ – кратність сили електричного струму відносно номінального значення.

Тоді

$$\theta_c = \tau_y + \vartheta_{cp} + 273. \quad (3.28)$$

де ϑ_{cp} - температура навколишнього середовища, °С.

Коефіцієнт втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні являє собою відношення фактичних втрат активної потужності ΔP до номінальних ΔP_n ,

тобто:

$$k_{ne} = \frac{\Delta P}{\Delta P_n}. \quad (3.29)$$

Номінальні втрати складаються з номінальних втрат у сталі $\Delta P_{c.n.}$ і номінальних втрат у міді $\Delta P_{m.n.}$, тобто:

$$\Delta P_n = \Delta P_{c.n.} + \Delta P_{m.n.}, \quad (3.30)$$

Фактичні втрати активної потужності складаються з номінальних втрат у сталі $\Delta P_{c.n.}$ і втрат у міді, які пропорційні квадрату кратності сили електричного струму, який споживає асинхронний електродвигун, тобто:

$$\Delta P = \Delta P_{c.n.} + k^2 \Delta P_{m.n.}, \quad (3.31)$$

Тоді коефіцієнт втрат активної енергії запишеться в такий спосіб:

$$k_{ne} = \frac{\Delta P_{c.n.} + k^2 \Delta P_{m.n.}}{\Delta P_{c.n.} + \Delta P_{m.n.}}, \quad (3.32)$$

або в іншому вигляді:

$$k_{ne} = \frac{a + k^2}{a + 1}. \quad (3.33)$$

Стале перевищення температури ізоляції з урахуванням (3.8) перепишемо в такий спосіб:

$$\tau_y = k_{ne} \tau_n. \quad (3.34)$$

Коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції являє собою відношення швидкості теплового зношення ізоляції $\mathcal{E}$ до номінального значення $\mathcal{E}_n$, тобто:

$$k_{ep} = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_n}, \quad (3.35)$$

або в іншому вигляді:

$$k_{ep} = e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{k_{ne} \tau_n + \theta_{ep} + 273} \right)}. \quad (3.36)$$

Дослідимо витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 у функції завантаження на валу з боку робочої машини. Результати розрахунку заносимо в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
$\Delta P, Bm$	281	294	313	347	382	417,8	460,7	522	604,6	641,3	716
k_{ne}	0,45	0,48	0,5	0,56	0,61	0,67	0,74	0,84	0,97	1,03	1,15
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
k_{ep}	0,005	0,007	0,008	0,012	0,018	0,028	0,047	0,094	0,180	0,321	0,660
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
k_{ep}	0,012	0,016	0,018	0,029	0,041	0,063	0,102	0,196	0,370	0,627	1,243
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
k_{ep}	0,029	0,036	0,042	0,063	0,089	0,133	0,210	0,391	0,710	1,183	2,271

На підставі отриманих результатів будемо залежність коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції у функції коефіцієнта завантаження асинхронного електродвигуна з боку робочої машини для заданої температури навколишнього середовища (рис.3.6)

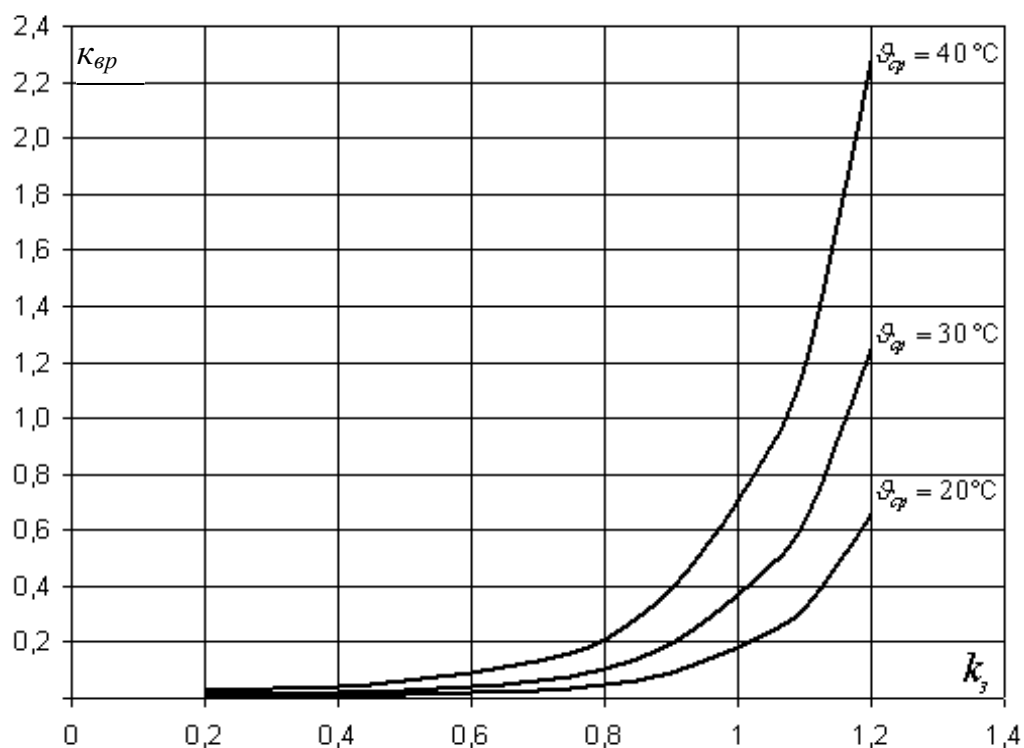


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції у функції коефіцієнта завантаження асинхронного електродвигуна з боку робочої машини для заданої температури навколишнього середовища.

3.4 Дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна у функції рівня напруги живлення й завантаження на валу з боку робочої машини.

Для дослідження коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції скористаємося результатами розрахунку втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції рівня напруги живлення й коефіцієнта завантаження на валу з боку робочої машини. Результати дослідження при кратності прикладеної напруги $k_u = 0,8$ й температурі навколишнього середовища $\vartheta_{cp} = 20^\circ\text{C}$, 30°C и 40°C заносимо в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
$\Delta P, \text{Bm}$	183	194	213	233	262	282	311	344	386	415	463
k_{ne}	0,29	0,31	0,34	0,37	0,42	0,45	0,5	0,55	0,62	0,67	0,74
$\vartheta_{cp}, ^\circ\text{C}$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
k_{ep}	0,001	0,002	0,002	0,003	0,004	0,005	0,008	0,011	0,020	0,028	0,047
$\vartheta_{cp}, ^\circ\text{C}$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
k_{ep}	0,003	0,004	0,005	0,007	0,010	0,012	0,018	0,027	0,370	0,063	0,102
$\vartheta_{cp}, ^\circ\text{C}$	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
k_{ep}	0,008	0,010	0,013	0,016	0,023	0,029	0,042	0,059	0,710	0,133	0,210

На підставі отриманих результатів будемо залежність коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції у функції коефіцієнта завантаження асинхронного електродвигуна з боку робочої машини для заданої температури навколишнього середовища при кратності напруги живлення $k_u = 0,8$ (рис. 3.7).

Результати дослідження при кратності прикладеної напруги $k_u = 0,85$ й температурі навколишнього середовища $\vartheta_{cp} = 20^\circ\text{C}$, 30°C и 40°C заносимо в табл. 3.6.

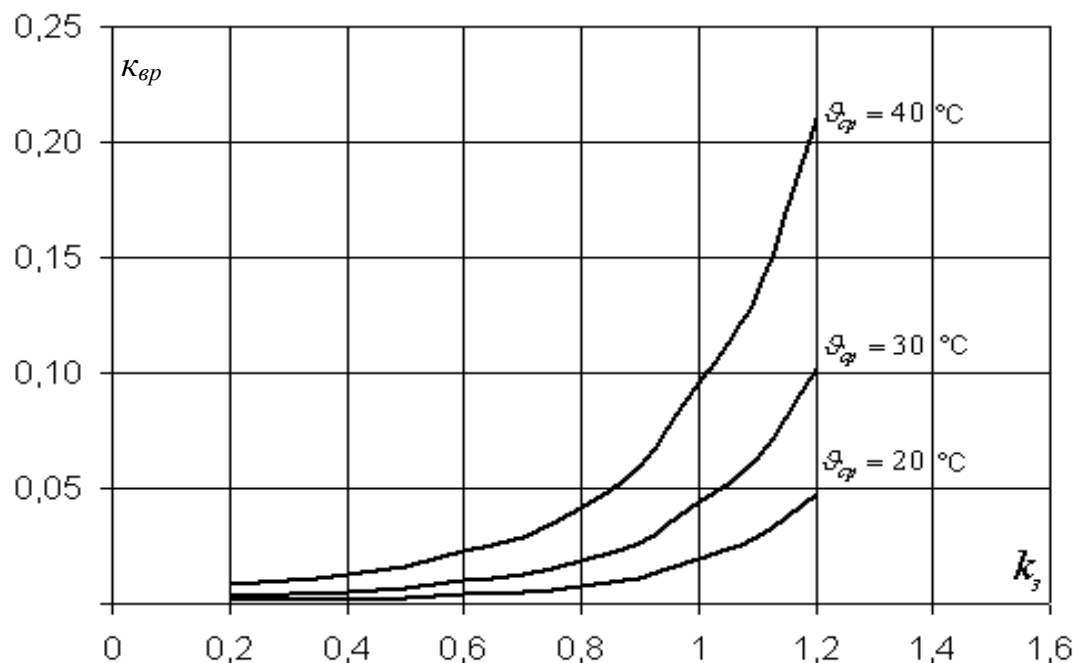


Рис. 3.7. Залежність коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції у функції коефіцієнта завантаження асинхронного електродвигуна з боку робочої машини для заданої температури навколишнього середовища при кратності напруги живлення $k_u = 0,8$.

Таблиця 3.6

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
$\Delta P, Bm$	210	226	247	274	302	339	375	414	472	514	573
k_{ne}	0,34	0,36	0,4	0,44	0,48	0,54	0,6	0,66	0,76	0,82	0,92
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
k_{ep}	0,002	0,002	0,003	0,005	0,007	0,011	0,017	0,026	0,048	0,082	0,160
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
k_{ep}	0,005	0,006	0,008	0,012	0,016	0,025	0,038	0,059	0,100	0,172	0,324
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
k_{ep}	0,013	0,015	0,020	0,027	0,036	0,055	0,084	0,125	0,220	0,346	0,631

На підставі отриманих результатів будуюмо залежність коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції у функції коефіцієнта завантаження асинхронного електродвигу-

на з боку робочої машини для заданої температури навколишнього середовища при кратності напруги живлення $k_u = 0,85$ (рис. 3.8).

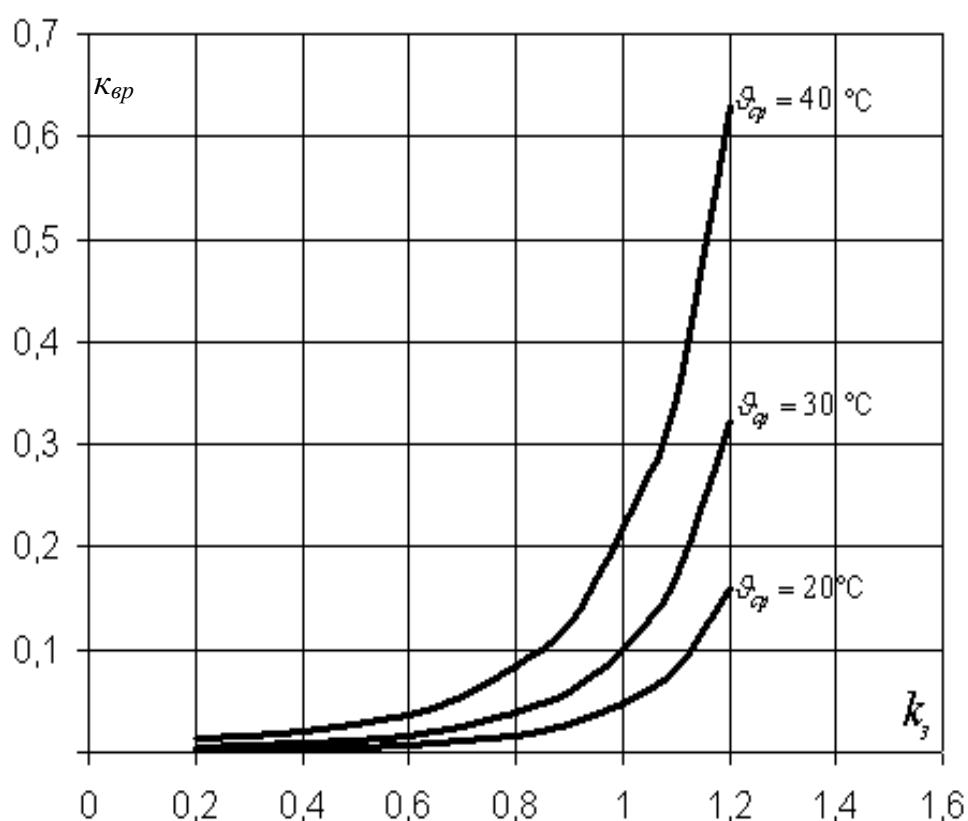


Рис. 3.8. Залежність коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції у функції коефіцієнта завантаження асинхронного електродвигуна з боку робочої машини для заданої температури навколишнього середовища при кратності напруги живлення $k_u = 0,85$.

Результати дослідження при кратності прикладеної напруги $k_u = 0,9$ й температурі навколишнього середовища $\theta_{ср} = 20^\circ\text{C}$, 30°C и 40°C заносимо в табл. 3.7.

На підставі отриманих результатів будуємо залежність коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції у функції коефіцієнта завантаження асинхронного електродвигуна з боку робочої машини для заданої температури навколишнього середовища при кратності напруги живлення $k_u = 0,9$ (рис. 3.9).

Таблиця 3.7

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
$\Delta P, Bm$	234	249	269	294	324	359	408	453	500	552	607
k_{ne}	0,38	0,4	0,43	0,47	0,52	0,58	0,65	0,73	0,8	0,88	0,97
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
k_{ep}	0,003	0,003	0,004	0,006	0,009	0,014	0,025	0,044	0,180	0,123	0,221
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
k_{ep}	0,007	0,008	0,011	0,015	0,021	0,033	0,055	0,095	0,151	0,252	0,439
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
k_{ep}	0,017	0,020	0,025	0,033	0,048	0,073	0,117	0,197	0,306	0,498	0,843

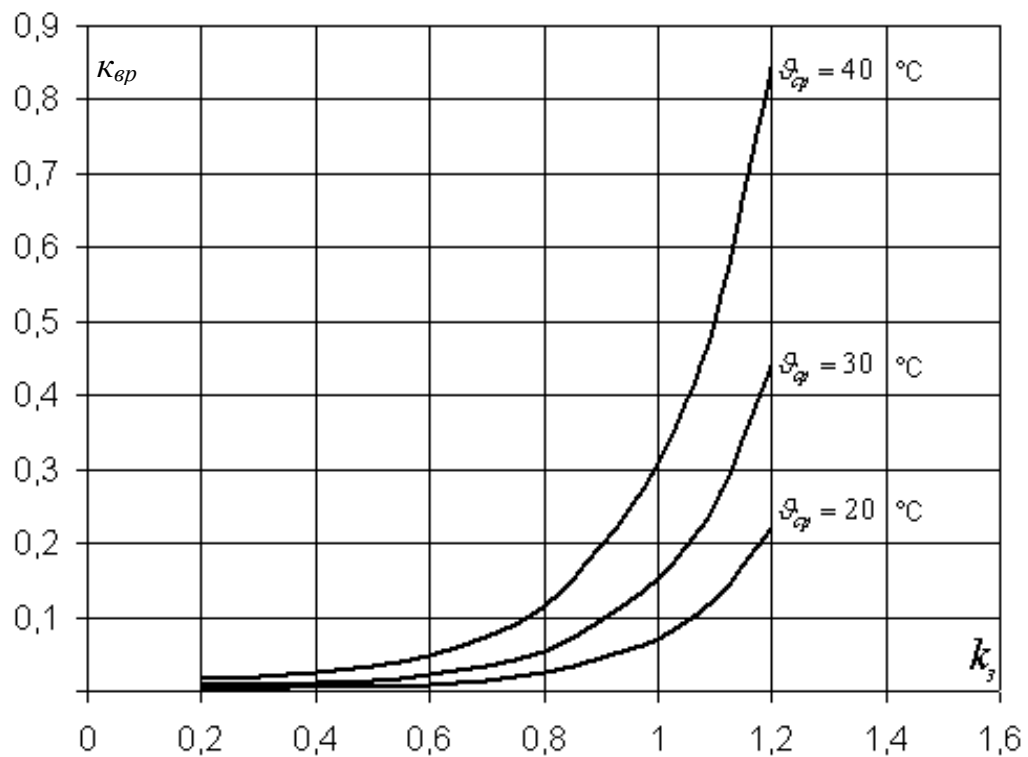


Рис. 3.9. Залежність коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції у функції коефіцієнта завантаження асинхронного електродвигуна з боку робочої машини для заданої температури навколишнього середовища при кратності напруги живлення $k_u = 0,9$.

3.5 Висновки

Дослідження витрат ресурсу ізоляції електродвигуна показало, що вони носять експоненціальний характер у функції введеного коефіцієнта втрат активної енергії, коефіцієнта завантаження і температури навколишнього середовища. Наприклад, для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 при коефіцієнті завантаження рівному одиниці зміна температури навколишнього середовища від 20 °C до 40 °C приводить до збільшення коефіцієнта витрат ресурсу від 0,19 до 0,7.

РОЗДІЛ 4.

РОЗРОБКА ДІАГНОСТУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ «ЕЛЕКТРОДВИГУН – РОБОЧА МАШИНА».

4.1 Методика діагностування режиму роботи електродвигуна.

На підставі наведених досліджень визначаємо два показники, які характеризують режими роботи асинхронного електродвигуна з позиції ресурсоенергозбереження: коефіцієнт втрат активної енергії k_{ne} й коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції k_{ep} .

Перше описується виразом (4.1):

$$k_{ne} = \frac{a + \kappa^2}{a + 1}, \quad (4.1)$$

$$\kappa = \frac{I}{I_n}.$$

де a – коефіцієнт втрат асинхронного електродвигуна (відношення втрат у сталі до втрат у міді при номінальному режимі роботи);

κ – кратність сили електричного струму, який споживає асинхронний електродвигун, відносно номінального значення;

I - сила електричного струму, який споживає електродвигун, А;

I_n - номінальне значення сили електричного струму, А.

Коефіцієнт втрат активної енергії являє собою відношення втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні до номінальних, тобто чим менше втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні, тим менше коефіцієнт втрат активної енергії.

У номінальному режимі роботи асинхронного електродвигуна коефіцієнт

втрат активної енергії можна вважати рівним одиниці.

Втрати активної потужності залежать як від завантаження асинхронного електродвигуна на валу з боку робочої машини, так і від рівня напруги живлення. Наприклад, при коефіцієнті завантаження $\kappa_z=0,4$ втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при кратностях напруги на затискачах електродвигуна $\kappa_u=0,8; 0,85; 0,9; 1$ відповідно рівні 213, 247, 269, 313 Вт (див. 2.4).

Таким чином, регулюючи величину напруги на затискачах електродвигуна у функції кратності сили електричного струму, можна встановлювати енергозберігаючий режим роботи асинхронного електродвигуна.

Коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції описується виразом:

$$k_{\hat{a}\delta} = \hat{a}^{\hat{A}} \left(\frac{1}{\theta_i} - \frac{1}{k_{i\hat{a}}\tau_i + \mathcal{G}_{\hat{n}\delta} + 273} \right). \quad (4.2)$$

де B – параметр, який характеризує клас ізоляції, K ;

θ_i – номінальна абсолютна температура ізоляції, K ;

τ_i – номінальне перевищення температури ізоляції, $^{\circ}C$;

$\mathcal{G}_{cp}$ – температура навколишнього середовища, $^{\circ}C$.

Коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції являє собою відношення швидкості зношення ізоляції в заданому режимі робіт до номінального значення швидкості зношення ізоляції.

У номінальному режимі роботи асинхронного електродвигуна коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції дорівнює одиниці

Таким чином, знаючи коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції, можна діагностувати режим роботи електродвигуна з позиції ресурсоенергозбереження.

Структурна схема пристрою діагностування асинхронного електродвигуна з позиції ресурсоенергозбереження наведена на рис. 4.1.

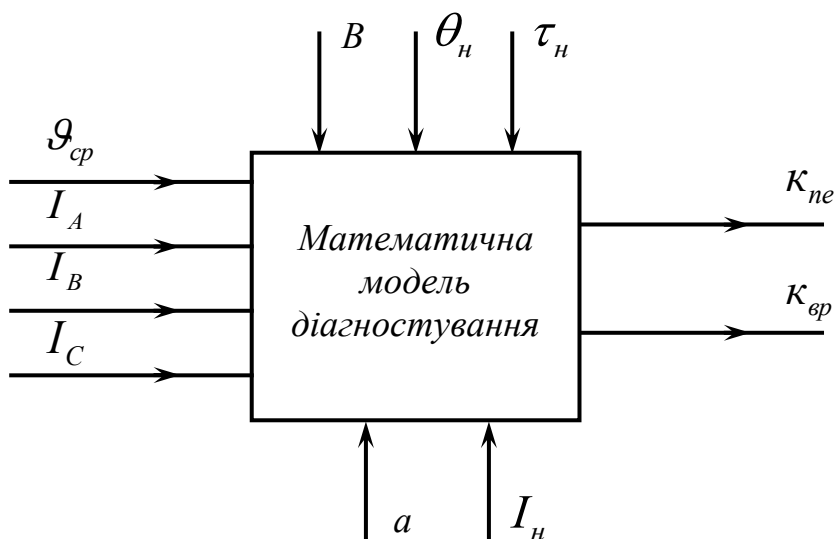


Рис. 4.1. Структурна схема пристрою діагностування асинхронного електродвигуна з позиції ресурсоенергозбереження.

4.2 Діагностування механічної частини системи «електродвигун - робоча машина».

Одним з основних місць, де втрачається активна потужність споживана електродвигуном приводу робочої машини, або робочого органу, є втрати потужності в механічній системі «електродвигун – робоча машина». Ці втрати активної потужності залежать як від конструктивних характеристик робочої машини, або робочого органу, так і від технічного стану конструктивних елементів робочої машини, або робочого органу, де спостерігається явище тертя.

Розглянемо схему заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором (рис. 4.2).

Активна потужність, яка передається на вал механічної частини системи «електродвигун – робоча машина», може бути визначена наступним чином:

$$P_{MX} = 3R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (4.3)$$

В свою чергу діюче значення струму:

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_1' + R_2''/s)^2 + (X_1' + X_2'')^2}}, \quad (4.4)$$

Підставивши (4.4) в (4.3), отримаємо:

$$D_{l\tilde{O}} = 3R_2'' \frac{1-s}{s} \frac{U^2}{(R_1' + \frac{R_2''}{s})^2 + (\tilde{O}_1' + \tilde{O}'')^2}. \quad (4.5)$$

Запишемо відому імперичну формулу моменту опору робочої машини:

$$M_{on} = M_0 + (M_n - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (4.6)$$

де M_{on} – момент опору на валу робочої машини, або робочого органу, Н·м;

M_0 – момент тертя, Н·м;

M_n – номінальний момент робочої машини, або робочого органу, Н·м;

ω – кутова швидкість валу електродвигуна, рад/с;

ω_n – номінальна кутова швидкість робочої машини, рад/с;

Як відомо, останній може мати чотири значення: 0, 1, 2, -1.

Запишемо вираз ковзання:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (4.7)$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість електродвигуна, рад/с;

З (4.7) знаходимо:

$$\omega = \omega_0 (1-s), \quad (4.8)$$

Для номінального режиму:

$$\omega_n = \omega_0 (1-s_n), \quad (4.9)$$

де s_n – номінальне ковзання електродвигуна.

Підставимо (4.8) та (4.9) в (4.6) і отримаємо :

$$M_{on} = M_0 + (M_n - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x, \quad (4.10)$$

Приймаємо, що номінальний момент робочої машини дорівнює номінальному моменту електродвигуна. Якщо привести в дію робочу машину на холостому ході, тобто без виконання корисної роботи, то активна потужність, яку буде споживати механічна частина системи «електродвигун – робоча машина», буде активною потужністю, яка втрачається на тертя.

У цьому випадку (4.10) приймає вигляд:

$$M_{on} = M_0 + (M_n \kappa_3 - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x, \quad (4.11)$$

де κ_z – коефіцієнт завантаження на валу системи «електродвигун – робоча машина».

Таким чином, знаючи ковзання та діюче значення напруги можна за допомогою (4.5) знайти активну потужність, яка передається на вал системи «електродвигун – робоча машина».

З цього випливає алгоритм діагностування втрат активної потужності в механічній системі «електродвигун – робоча машина»:

1. Вимірюється ковзання асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при холостому ході робочої машини, тобто без завантаження.
2. Вимірюється діюче значення напруги на затискачах електродвигуна.
3. Розраховується активна потужність, яка втрачається на тертя в механічній частині системи «електродвигун – робоча машина».
4. Отриманні значення активної потужності порівнюються зі значеннями активної потужності на тертя, які зафіксовані при введенні робочої машини в експлуатацію.

4.3 Діагностування роботоздатності асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

Розглянемо схему заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором (рис. 4.2).

При ідеальному холостому ході електродвигуна (ковзання дорівнює нулю) знаходимо діюче значення сили струму

$$I_0 = \frac{U}{Z_0}, \quad (4.12)$$

де Z_0 – повний опір контуру намагнічення.

Запишемо комплекс повного опору контуру намагнічення:

$$Z_0 = R_1 + jX_1 + \frac{R_m jX_\mu}{R_m + jX_\mu} = Z_0 e^{j\varphi_0}. \quad (4.13)$$

При номінальному навантаженні електродвигуна сила струму має номінальне значення I_n .

Приймаємо, що струм на ділянці від значення I_0 до значення I_n в залежності від ковзання змінюється за лінійним характером (рис. 4.3).

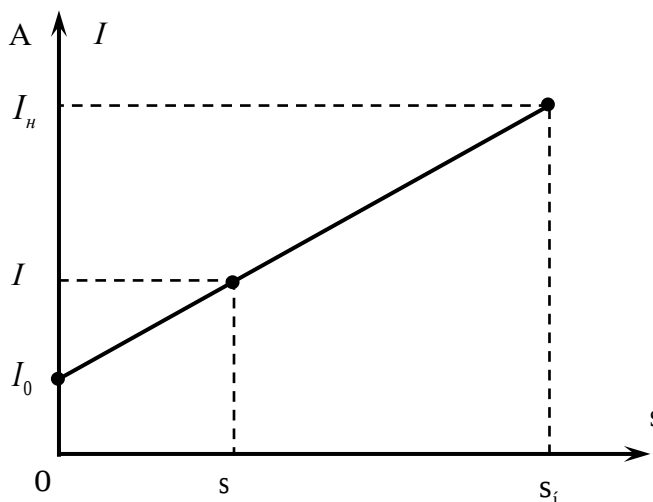


Рис. 4.3. Залежність сили струму асинхронного електродвигуна від ковзання.

З подібних трикутників маємо відношення:

$$\frac{I_n - I_0}{s_n} = \frac{I_n - I}{s}, \quad (4.14)$$

звідки знаходимо:

$$I = I_0 + (I_n - I_0) \frac{s}{s_n}. \quad (4.15)$$

Таким чином, пропонується наступна методика визначення роботоздатності асинхронного електродвигуна:

1. Електродвигун включається в роботу при номінальній напрузі без завантаження робочої машини.
2. Вимірюється сила струму, який споживає електродвигун.
3. Вимірюється ковзання електродвигуна.
4. Розраховується сила струму за виразом (4.15).
5. Порівнюються значення сили струму, яка виміряна і яка отримана за виразом (4.15) і робиться висновок про роботоздатність електродвигуна.

4.4 Висновки

4.4.1 На базі проведеного дослідження отримана математична модель діагностування режиму роботи асинхронного електродвигуна з позиції ресурсоенергозбереження. Вихідною функцією моделі є коефіцієнти втрат енергії і витрат ресурсу ізоляції. Якщо один з них або обидва перевищують значення одиниці, то пристрій спрацьовує на сигнал про необхідність в технологічну паузу провести аналіз режиму роботи електродвигуна.

4.4.2 Розроблено метод діагностування асинхронного електродвигуна на роботоздатність, в основу якого покладена досліджувана залежність сили струму, який споживає електродвигун у функції ковзання при вводі його в експлуатацію для порівняння з досліджуваним періодом експлуатації.

4.4.3 Розроблено метод діагностування робочої машини з позиції енергозбереження, в основу якого покладена досліджувана активна потужність, яка втрачається в робочій машині при вводі її в експлуатацію, для порівняння з досліджуваним періодом експлуатації.

РОЗДІЛ 5.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ І ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

5.1 Перевірка математичної моделі втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні

Проведено дослідження математичної моделі втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні на адекватність. Для цього була створена експериментальна установка рис. 5.1. Навантаження електродвигуна виконувалось за допомогою генератора постійного струму G2 з реостатом навантаження R_n . Ковзання електродвигуна вимірювалось тахогенератором G1. Активна потужність, яку споживав електродвигун вимірювалась за допомогою комплекту КВП типу К – 50. В якості досліджуваного електродвигуна використовувався електродвигун М типорозміру 4A100S2Y3, для якого досліджувались втрати активної потужності аналітичним шляхом. Втрати активної потужності в електродвигуні знаходились як різниця активної потужності яку споживав електродвигун і потужності яка передавалась на вал електродвигуна. Перша потужність вимірювалась за допомогою комплекту КВП, друга розраховувалась аналітичним шляхом за допомогою параметрів Г – образної схеми заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна та вимірюного ковзання. Результати наведені на рис. 5.2, на якому 1 – теоретична крива, 2 – експериментальна крива.

Експериментальне дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні.

Втрати активної потужності в електродвигуні:

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (5.1)$$

Механічна потужність на валу електродвигуна:

$$P_2 = 3R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (5.2)$$

$$I'^2 = \frac{U^2}{(R'_1 + R''_2/s)^2 + (X'_1 + X''_2)^2}.$$

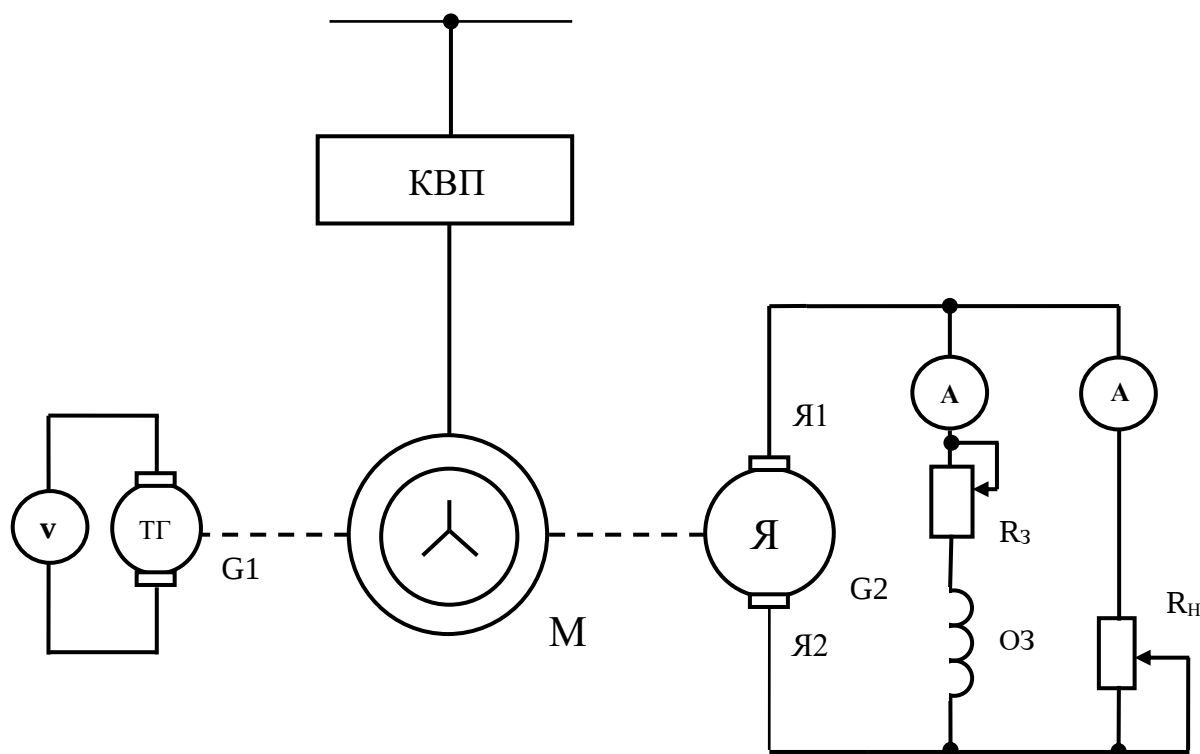


Рис. 5.1. Експериментальна установка дослідження математичної моделі втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні.

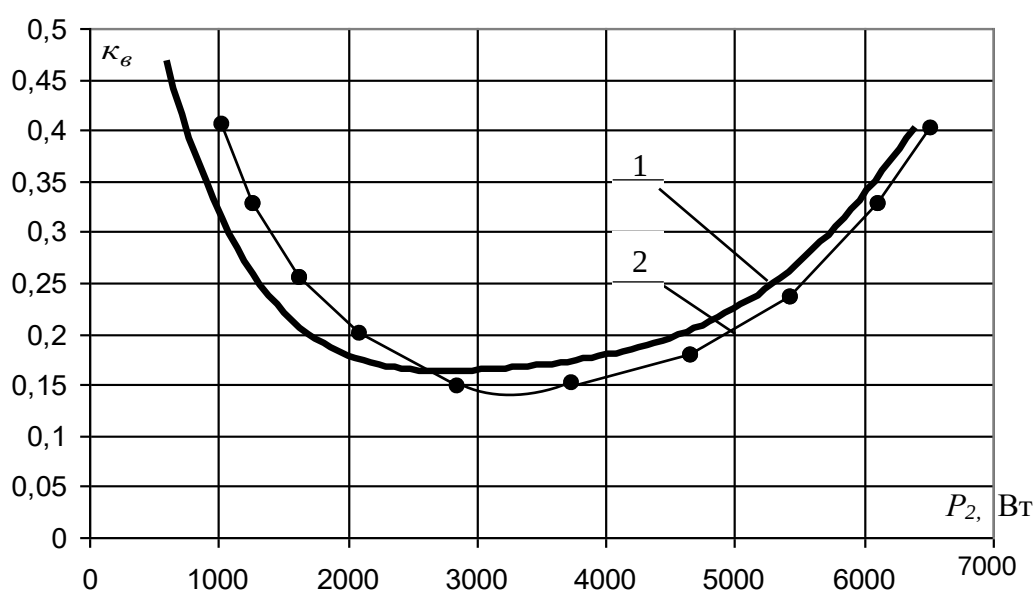


Рис.5.2. Залежність втрат активної потужності в електродвигуні у функції завантаження (1 – теоретична крива, 2 – експериментальна крива).

Статистична адекватність математичної моделі втрат активної потужності встановлювалась за допомогою F – критерія Фішера [152,153].

Критичне значення F – критерія Фішера для рівня значимості ступенів свободи

$$f_1 = p = 1 \text{ і } f_2 = m - p - 1 = 49 \text{ складає:}$$

$$F_{кр(0,05;1;49)} = 4,038.$$

Для нашого випадку маємо $F = 2.74$.

Так як виконується умова $F < F_{кр}$, то математична модель втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні признається адекватною експериментальним даним.

5.2 Математична модель енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна

В результаті проведених досліджень була запронована математична модель енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна та алгоритм її використання. Варіант такої математичної моделі наведено на прикладі приводу робочої машини з лінійно – зростаючою механічною характеристикою.

Алгоритм використання моделі наступний:

1. Вимірюється ковзання s
2. Розраховується коефіцієнт завантаження електродвигуна:

$$k_3 = \frac{\left(\frac{1-s}{s_H} - m_0\right)s + m_0 s_H}{1-s}, \quad (5.3)$$

3. Розраховується ковзання електродвигуна при зниженій напрузі:

$$s = \frac{k_3 - m_0 s_H}{\frac{1-s_H}{s_H} k_u^2 + k_3 - m_0}, \quad (5.4)$$

4. Розраховуються втрати активної потужності в намагнічуючому контурі:

$$\Delta P_c = k_u^2 \Delta P_{c.H}, \quad (5.5)$$

5. Розраховуються втрати активної потужності в обмотках електродвигуна:

$$\Delta P_{\text{м}} = 3(R'_1 + R''_2)I'^2, \quad (5.6)$$

$$I'^2 = \frac{k_u^2 U_{\text{н}}^2}{(R'_1 + \frac{R''_2}{s})^2 + (X'_1 + X'')^2}, \quad (5.7)$$

6. Розраховуються загальні втрати активної потужності:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{м}}, \quad (5.8)$$

7. Знаходиться значення k_u за умови:

$$\Delta P = \min. \quad (5.9)$$

5.3 Розробка пристрою забезпечення енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна

В якості пристрою забезпечення енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна використовується стандартна апаратура, зокрема м'який тиристорний пускач з блоком програмування і тахогенератор, рис. 5.3.

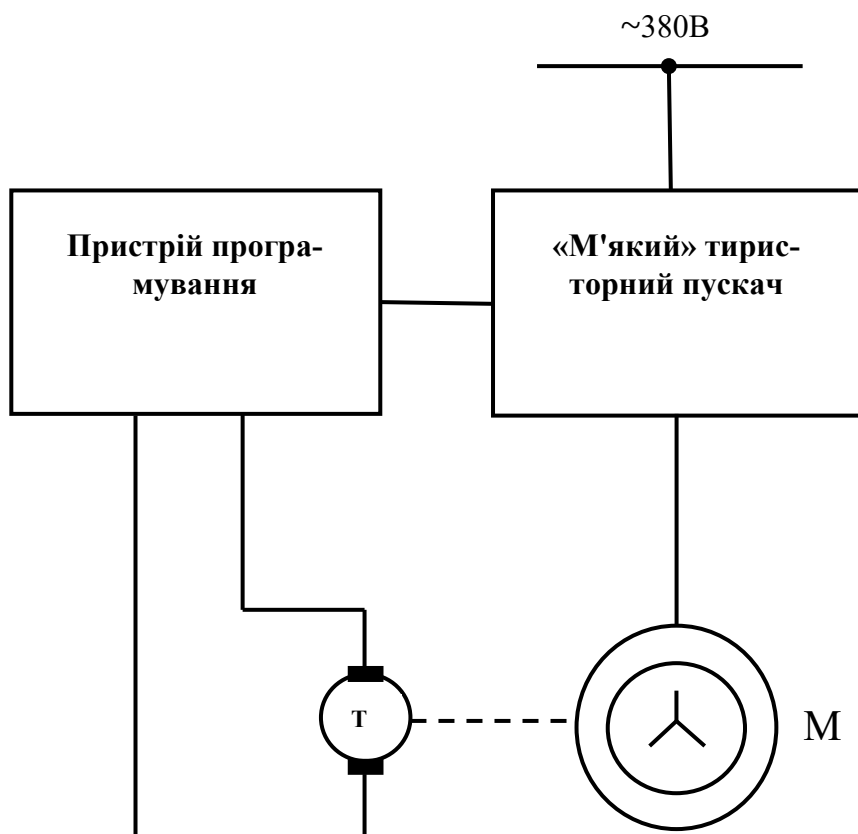


Рис. 5.3. Пристрій енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна.

5.4 Техніко – економічне обґрунтування пристрою забезпечення ресурсоенергозберігаючого режиму роботи асинхронного електро- двигуна

Після втілення пристрою очікується зменшення проценту виходу із ладу електродвигунів за рахунок своєчасного діагностування режимів їх роботи, а також зниження кількості споживаної електричної енергії за рахунок оптимізації рівня підведеної напруги у функції завантаження електродвигуна. Кількісні показники наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

№ з/п	Показник	Одиниця	Результат	
			Існуючий	Очікуваний
1	Вихід із ладу електродвигунів	%	20-25	10-15
2	Вартість капітального ремонту електродвигуна	грн.	до 700	350-525
3	Річний економічний ефект на один двигун	грн.	-	350-175
4	Очікувана вартість пристрою із розрахунку на один двигун	грн.	-	до 500
5	Термін окупності	років	-	1,4-2,8
6	Зниження споживання електричної енергії	%	-	до 15
7	Зменшення споживання електричної енергії приводом дробарки в приватній фірмі «МЮННТ»	%	-	15
8	Річний економічний ефект від втілення пристрою на приводі дробарки	грн.	-	6412
9	Зменшення споживання електричної енергії на пункті приготування кормів у приватному сільськогосподарському підприємстві «ТОП-агро»	грн.	-	15
10	Річний економічний ефект від втілення пристрою на пункті приготування кормів	грн.	-	855
11	Зменшення споживання електричної енергії в кормоцеху фермерського господарства «ПЛОВ»	%	-	14
12	Річний економічний ефект від втілення пристрою в кормоцеху	грн.	-	1097

5.5 Висновки

5.5.1 Експериментальні дослідження адекватності математичної моделі втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні показують, що за F-критерієм Фішера математична модель діагностування адекватна експериментальним даним. Так, критичне значення F-критерія Фішера складає 4,038, а для досліджуваного процесу 2,74, що менше критичного.

5.5.2 Дослідження залежності втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції як коефіцієнта завантаження, так і коефіцієнта прикладеної напруги, покладено в основу математичної моделі пристрою енергозбереження в приводі робочої машини. Наприклад, для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 при коефіцієнті завантаження 0,4 втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при кратностях напруги на затискачах електродвигуна 0,8; 0,85; 0,9; 1 відповідно рівні 213, 247, 269, 313 Вт.

5.5.3 На базі розробленої математичної моделі енергозбереження з використанням «м'якого» тиристорного пускача розроблено пристрій енергозбереження за рахунок оптимізації значення прикладеної напруги до електродвигуна.

5.5.4 Втілення пристрою забезпечення ресурсоенергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна в сільськогосподарських підприємствах показує, що кількість споживаної електричної енергії за рік зменшується на 14-15%.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-прикладна задача ресурсоенергозбереження в системі асинхронний електродвигун-робоча машина в умовах агропромислового комплексу. В результаті виконання роботи зроблені наступні висновки:

1. Аналіз роботи систем асинхронний двигун-робоча машина показав, що в умовах агропромислового комплексу втрати активної енергії в асинхронних електродвигунах і робочих машинах складають від 30 до 40 відсотків від активної енергії, яка споживається на корисну роботу в робочих машинах, а вихід із ладу асинхронних електродвигунів щорічно складає до 20 відсотків загального парку електродвигунів, що експлуатуються.

2. Аналіз втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні шляхом дослідження введеного коефіцієнту втрат активної потужності у функції активної потужності на валу електродвигуна з урахуванням росту активного опору обмоток при нагріванні показав, що вона носить екстремальний характер і може бути використана для створення енергозберігаючого режиму роботи електродвигуна. Наприклад, для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 номінальною потужністю 4 кВт енергозберігаючим режимом його роботи є режим при навантаженні на валу від 2 до 3,8 кВт.

3. Дослідження витрат ресурсу ізоляції електродвигуна показало, що вони носять експоненціальний характер у функції введеного коефіцієнта втрат активної енергії, коефіцієнта завантаження і температури навколишнього середовища. Наприклад, для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 при коефіцієнті завантаження рівному одиниці зміна температури навколишнього середовища від 20 °C до 40 °C приводить до збільшення коефіцієнта витрат ресурсу від 0,19 до 0,7.

4. На базі проведеного дослідження отримана математична модель діагностування режиму роботи асинхронного електродвигуна с позиції ресурсоенергозбереження. Вихідною функцією моделі є коефіцієнти втрат енергії і витрат ресурсу ізоляції. Якщо один з них або обидва перевищують значення одиниці, то пристрій

спрацьовує на сигнал про необхідність в технологічну паузу провести аналіз режиму роботи електродвигуна.

5. Розроблено метод діагностування асинхронного електродвигуна на роботоздатність, в основу якого покладена досліджувана залежність сили струму, який споживає електродвигун у функції ковзання при вводі його в експлуатацію для порівняння з досліджуваним періодом експлуатації.

6. Розроблено метод діагностування робочої машини з позиції енергозбереження, в основу якого покладена досліджувана активна потужність, яка втрачається в робочій машині при вводі її в експлуатацію, для порівняння з досліджуваним періодом експлуатації.

7. Експериментальні дослідження адекватності математичної моделі втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні показують, що за F-критерієм Фішера математична модель діагностування адекватна експериментальним даним. Так, критичне значення F-критерія Фішера складає 4,038, а для досліджуваного процесу 2,74, що менше критичного.

8. Дослідження залежності втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції як коефіцієнта завантаження, так і коефіцієнта прикладеної напруги, покладено в основу математичної моделі пристрою енергозбереження в приводі робочої машини. Наприклад, для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 при коефіцієнті завантаження 0,4 втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при кратностях напруги на затискачах електродвигуна 0,8; 0,85; 0,9; 1 відповідно рівні 213, 247, 269, 313 Вт.

9. На базі розробленої математичної моделі енергозбереження з використанням «м'якого» тиристорного пускача розроблено пристрій енергозбереження за рахунок оптимізації значення прикладеної напруги до електродвигуна. У результаті втілення пристрою в приватній агрофірмі «МЮННТ» зменшено споживання електричної енергії на приводі дробарки на 15 %, що склало річний економічний ефект у розмірі 6412 гривень.

УТВЕРЖДАЮ



УТВЕРЖДАЮ



АКТ

**внедрения результатов научно-исследовательских,
опытно-конструкторских и технологических работ**

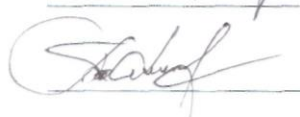
Мы, нижеподписавшиеся, представители Таврического государственного агротехнологического университета - заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники доктор технических наук Овчаров Владимир Васильевич и инженер Телюта Руслан Васильевич, с одной стороны и представитель частной агрофирмы «МІОННТ» - главный энергетик Васильченко Виктор Васильевич, с другой стороны составили настоящий акт о том, что с 1 июня 2011 года по 1 августа 2011 года в результате проведения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по теме диссертационной работы Телюты Руслана Васильевича «Ресурсоэнергосберегающие режимы работы системы асинхронный электродвигатель – рабочая машина в условиях агропромышленного комплекса» на линии приготовления кормов комбикормового завода внедрено на электроприводе дробилки устройство оптимальной её загрузки и регулирования уровня подведенного напряжения с целью экономии электрической энергии.

От внедрения получен следующий технико-экономический эффект: снижено потребление электрической энергии на 15%, годовой экономический эффект составляет 6412 гривен.

Предложения по дальнейшему внедрению результатов работы: распространить внедрение устройства на другие регулируемые по производительности рабочие машины.

Представители университета


В.В.Овчаров


Р.В.Телюта

Представитель агрофирмы


В.В.Васильченко

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ЧСП «ТОПАгро»

С.Н.Топчий

«2» августа 2011 года

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ТГАТУ
профессор

В.Н.Кюрчев

2011 года

АКТ**внедрения результатов научно-исследовательских,
опытно-конструкторских и технологических работ**

Мы, нижеподписавшиеся, представители Таврического государственного агротехнологического университета – заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники доктор технических наук Овчаров Владимир Васильевич и инженер Телюта Руслан Васильевич, с одной стороны и представитель частного сельскохозяйственного предприятия «ТОПАгро» - заместитель директора Титаренко Сергей Валентинович, с другой стороны составили настоящий акт о том, что с 1 июня 2011 года по 1 августа 2011 года в результате проведения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по теме диссертационной работы Телюты Руслана Васильевича «Ресурсоэнергосберегающие режимы работы системы асинхронный электродвигатель – рабочая машина в условиях агропромышленного комплекса» на пункте приготовления кормов – внедрено на электроприводе дробилки зерна устройство оптимальной его загрузки и регулирования уровня подведенного напряжения с целью экономии электрической энергии.

От внедрения получен следующий технико-экономический эффект: снижено потребление электрической энергии на 15%, годовой экономический эффект составляет 855 гривен.

Предложения по дальнейшему внедрению результатов работы: распространить внедрение устройства на другие регулируемые по производительности рабочие машины.

Представители университета

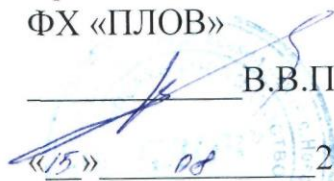
В.В.Овчаров

Р.В.Телюта

Представитель сельскохозяйственного предприятия

С.В.Титаренко

УТВЕРЖДАЮ

Председатель
ФХ «ПЛОВ»
В.В.Пасичный
«15» 08 2011 года


УТВЕРЖДАЮ

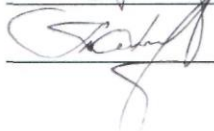
Ректор ТГАУ
профессор
В.Н.Кюрчев
2011 года
**АКТ****внедрения результатов научно-исследовательских,
опытно-конструкторских и технологических работ**

Мы, нижеподписавшиеся, представители Таврического государственного агротехнологического университета – заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники доктор технических наук Овчаров Владимир Васильевич и инженер Телюта Руслан Васильевич, с одной стороны и представитель фермерского хозяйства «ПЛОВ» - главный электрик Камяниченко Василий Петрович, с другой стороны составили настоящий акт о том, что с 1 июня 2011 года по 1 августа 2011 года в результате проведения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по теме диссертационной работы Телюты Руслана Васильевича «Ресурсоэнергосберегающие режимы работы системы асинхронный электродвигатель – рабочая машина в условиях агропромышленного комплекса» в кормоцеху – внедрено на электроприводе дробилки зерна устройство оптимальной его загрузки и регулирования уровня подведенного напряжения с целью экономии электрической энергии.

От внедрения получен следующий технико-экономический эффект: снижено потребление электрической энергии на 14%, годовой экономический эффект составляет 1097 гривен.

Предложения по дальнейшему внедрению результатов работы: распространить внедрение устройства на другие регулируемые по производительности рабочие машины.

Представители университета


В.В.Овчаров

Р.В.Телюта

Представитель хозяйства


В.П.Камяниченко

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ермолаев С.А.* Эксплуатация и ремонт электрооборудования и средств автоматизации в системе АПК / *С. А. Ермолаев, В.А. Мунтян., В.Н. Кюрчев* // – К.: Альтур, 1997. – 414с.
2. *Алиханян К.А.* Новые асинхронные двигатели в АПК / *К.А. Алиханян*// Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 8. – С.53 – 56.
3. Применение электрической энергии в сельскохозяйственном производстве / *П. Н. Листова* // Справочник. – М.: Колос, 1974. – 623с.
4. *Курбатова Г.С.* Электродвигатели для сельского хозяйства / *Г.С. Курбатова* // – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 63с.
5. *Овчаров В.В.* Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / *В.В. Овчаров* // – К.: УСХА, 1990. – 168с.
6. *Мишин И.С.* Основные направления повышения надёжности электродвигателей в сельском хозяйстве / *И.С. Мишин, А.А. Глебович* // Тр. ВСХИЗО. – М.: ВСХИЗО. – 1977. – № 135. – С.3 – 8.
7. *Ермолин Н.П.* Надёжность электрических машин / *Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин* // – Л.: Энергия, 1976. – 248с.
8. *Поспелов Г.Е.,* Надёжность электроустановок сельскохозяйственного назначения / *Г.Е. Поспелов, В.И. Русан* // – Минск: Ураджай, 1982. – 166с.
9. Надёжность асинхронных двигателей / Под ред. *Б. Н. Ванеева.* – К.: Техніка, 1983. – 143с.
10. *Антонов М.В.* Эксплуатация и ремонт электрических машин / *М.В. Антонов, Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец* // Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 1989. – 192с.
11. *Оськин С.В.* Повышение надёжности электропривода сельскохозяйственных машин / *С.В. Оськин* // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – № 3. – С.19.

12. *Корчемный Н.А.* К вопросу надёжности электродвигателей, работающих на животноводческих фермах / *Н.А. Корчемный, В.П. Машевский* // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – К.: Урожай, 1976. – Вып.35. – С.71 – 75.
13. *Корчемный Н.А.* Повышение надёжности электрооборудования в сельском хозяйстве / *Н.А. Корчемный, В.П. Машевский* // – К.: Урожай, 1988. – 176с.
14. *Корчемний М.О.* Експлуатаційна надійність електродвигунів у сільськогосподарському виробництві / *М.О. Корчемний, А.Ф. Філоненко, Н.А. Юсупов* // Механізація та електрифікація сільського господарства. – К.: Урожай, 1991. – Вип.73. – С.78 – 80.
15. *Rusny Jiri.* Analyza elektrikeho stroje točiveho 2 hlediska zivonosti / *Jiri Rusny* // Elektrotechnik. – 1987. – 42, № 10. – С. 300 – 303.
16. Справочник по электрическим машинам: В 2-х т., Т.1 / *И. П. Копылова, Б. К. Клокова* // – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456с.
17. *Радин В.И.* Электрические машины: Асинхронные машины / *В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, И. П. Копылова* // Учебное пособие – М.: Высш. шк., 1986. – 127с.
18. *Иноземцев Г.Б.* Виды повреждения и причины выхода из строя электродвигателей в сельскохозяйственном производстве / *Г.Б. Иноземцев, И.И. Ефименко, М.Е. Колекуст* // Сборник научн. тр. УСХА. – К.: УСХА, 1972. – Вып.54. – С.42 – 45.
19. *Миронов Ю.Р.* Передвижная электродиагностическая установка / *Ю.Р. Миронов* // Техника в сельском хозяйстве. – 1986. – № 10. – С.52.
20. *Таран В.П.* Диагностирование электрооборудования / *В.П. Таран* // – К.: Техніка, 1983. – 200с.
21. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий / *Госагропром СССР* // – М.: Агропромиздат, 1987. – 191с.

22. *Левченко В.М.* Электродвигатели асинхронные импортные. Техническое обслуживание / *В.М. Левченко, В.П. Таран, В.В. Чаплицкий* // – М.: ГОСНИТИ, 1983. – 28с.

23. *Таран В.П.* Электродвигатели сельскохозяйственного исполнения / *В.П. Таран, А.В. Синельник, Л.О. Бучна* // Техническое обслуживание. – М.: ГОСНИТИ, 1984. – 20с.

24. *Ghosh S.N.* Maintenance of electrical machines / *S.N. Ghosh* // *Electrical India*. – 1986. – 26, № 1. – P.11 – 12.

25. *Куйбышев А.Б.* Надёжность асинхронных электродвигателей общепромышленного применения / *А.Б. Куйбышев* // – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 104с.

26. *Гольдберг О.Д.* Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей / *И.М. Абдуллаев, А.Н. Абиев, О. Д. Гольдберг* // – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160с.

27. *Овчаров В.В.* Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / *В.В. Овчаров* // – К.: УСХА, 1990. – 168 с.

28. *Грундулис Л.О.* Защита электродвигателей в сельском хозяйстве / *Л.О. Грундулис* // – М.: Колос, 1982. – 64с.

29. *Калитвянский В.И.* Общие закономерности теплового старения полимерных диэлектриков / *В.И. Калитвянский* // *Электричество*. – 1955. – № 3. – С, 57 – 61.

30. *Калитвянский В.И.* Продолжительность службы новых видов изоляции электрических машин / *В.И. Калитвянский, А.В. Ковальская* // *Электричество*. – 1955. – № 10. – С. 40 – 44.

31. *Тищенко Н.А.* Проблема надежности электродвигателей / *Н.А. Тищенко* // *Электричество*. – 1961. – № 11. – С. 7 – 13.

32. *Гольдберг О.Д.* О надежности асинхронных двигателей / *О.Д. Гольдберг, Т.Г. Сорокер, И.П. Чарахчян* // *Вестник электропромышленности*. – 1962. – № 9. – С.62 – 67.

33. *Козырев Н.А.* Изоляция электрических машин и методы ее испытания / *Козырев* // – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 264с.
34. Дискуссия о надежности электрических машин // *Вести электропромышленности*. – 1963. – № 2. – С.55 – 61.
35. *Чарахчян И.П.* Влияние способа заливки и изоляции короткозамкнутой клетки от сердечника ротора на показатели асинхронных двигателей / *И.П. Чарахчян, А.П. Воскресенский* // *Электротехника*. – 1964. – № 1. – С.38 – 41.
36. *Половко А.М.* Основы теории надежности / *А.М. Половко* // – М.: Наука, 1964. – 446с.
37. *Гнеденко Б.В.* Математические методы в теории надежности / *Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев* // – М.: Наука, 1965. – 524с.
38. *Алексеевский В.В.* Электрические машины мощностью до 100 кВт с открытыми пазами и магнитными клиньями / *В.В. Алексеевский, Ю.С. Чатинян, Л.К. Галстян* // *Электротехника*. – 1965. – № 9. – С.10 – 13.
39. *Белова Л.А.* Вероятность аварийного пробоя изоляции обмоток статоров турбогенераторов в зависимости от длительности их работы / *Л.А. Белова, Л.Г. Мамиконянц, В.Н. Тутубалин* // *Электричество*. – 1965. – № 4. – С.42 – 47.
40. *Леонович А.С.* Определение количественных характеристик надежности и закона распределения времени безотказной работы некоторых типов электрических машин / *А.С. Леонович* // *Электротехника*. – 1965. – № 6. – С.9 – 14.
41. *Альтман А.Б.* Металлокерамические материалы для магнитных клиньев электрических машин / *А.Б. Альтман, П.А. Гладышев, И.Д. Растачаев* // *Электротехника*. – 1966. – № 2. – С.8 – 11.
42. *Муравлев О.П.* Влияние обмоточно-изолирующих работ на пробивное напряжение витковой и корпусной изоляции асинхронных электродвигателей / *О.П. Муравлев, Ю.П. Похолков, Э.К. Стрельбицкий* // *Электротехника*. – 1966. – №1. – С.109 – 110.
43. *Леонович А.С.* О законе распределения времени безотказной работы электродвигателей / *А.С. Леонович* // *Электромеханика*. – 1967. – № 8. – С.858 – 863.

44. *Гольдберг О.Д.* Определение надежности конструкции изоляции электрических машин при номинальных значениях эксплуатационных факторов / *О.Д. Гольдберг, П.М. Хазановский* // *Электротехника*. – 1967. – № 7. – С.28 – 29.
45. *Гольдберг О.Д.* Расчет надежности межвитковой изоляции электрических машин с выпной обмоткой / *О.Д. Гольдберг, П.М. Хазановский* // *Электротехника*. – 1967. – № 1. – С.25 – 28.
46. *Гольдберг О.Д.* Ускоренной экспериментальной оценки надежности конструкции изоляции электрических машин / *О.Д. Гольдберг, П.М. Хазановский* // *Электротехника*. – 1967. – № 10. – С.28 – 30.
47. *Лодочников Э.А.* Некоторые экспериментальные показатели надежности микроэлектродвигателей постоянного тока / *Э.А. Лодочников, С.С. Сомов* // *Электротехническая промышленность*. – 1967. – № 281. – С.3 – 5.
48. *Рябинин И.А.* Основы теории и расчета надежности судовых электро-энергетических установок / *И.А. Рябинин* // – Л.: Судостроение, 1967. – 362с.
49. *Ермолин Н.П.* Электрические машины малой мощности / *Н.П. Ермолин* // – М.: Высш. шк., 1967. – С. 13 – 24.
50. *Дегиль Г.С.* Повышение мощности и надежности турбогенераторов ТГВ 200 / *Г.С. Дегиль* // – Киев: Техніка, 1968. – 84с.
51. *Койков С.Н.* Электрическое старение твердых диэлектриков / *С.Н. Койков, А.Н. Цикин* // – Л.: Энергия, 1968. – 186с.
52. *Гольдберг О.Д.* Качество и надежность асинхронных двигателей / *О.Д. Гольдберг* // – М.: Энергия, 1968. – 176с.
53. Методы анализа надежности электрических машин / *В. М. Быков* // – М.: Наука. 1968. – 118с.
54. *Гольдберг О.Д.* Влияние коммутационных перенапряжений на надежность низковольтных асинхронных двигателей / *О.Д. Гольдберг, И.М. Комлев, Н.И. Суворов* // *Электротехника*. – 1968. – № 5. – С.14 – 18.
55. *Семяшкин Ф.И.* Надежность высоковольтных асинхронных двигателей тепловых электростанций / *Ф.И. Семяшкин* // *Электротехника*. – 1969. – № 4. – С.52 – 53.

56. *Гольдберг О.Д.* Статистическая оценка нового косвенного метода контроля неравномерности воздушного зазора асинхронных двигателей / *О.Д. Гольдберг, Р.И. Талышинский, Р.А. Исаева* // *Электротехника*. – 1969. – № 1. – С.22 – 26.
57. *Исакович М.М.* Странение вибрации электрических машин / *М.М. Исакович, Л.И. Клейман, Б.Х. Перчанок* // – Л.: Энергия, 1969. – 216с.
58. *Каганов Э.Г.* Волновые перенапряжения в электрических машинах / *Э.Г. Каганов* // – М.: Энергия, 1970. – 208с.
59. *Сотсков Б.С.* Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники / *Б.С. Сотсков* // – М.: Высш. шк., 1970. – 270с.
60. *Брызгалов В.А.* Исследование отказов асинхронных двигателей мощностью от 0,6 до 100 кВт / *В.А. Брызгалов* // *Электротехническая промышленность*. – 1970. – № 2. – С.26 – 27.
61. Надежность и качество электрических машин малой мощности / *В. В. Хрущева* // – М.: Наука, 1971. – 119с.
62. *Чувиляева Э.М.* Ускорение испытаний машин малой мощности на долговечность и надежность / *Э.М. Чувиляева, А.С. Иванов* // *Электротехническая промышленность*. – 1971. – № 6. – С.18 – 19.
63. *Рыбаков В.С.* Анализ причин отказов электрических машин малой мощности при испытаниях на долговечность и надежность / *В.С. Рыбаков, З.М. Чувиляева, Е.Д. Несговорова* // *Электротехническая промышленность*. – 1971. – С.20 – 21.
64. *Зиберов В.Н.* Влияние магнитных клиньев и магнитной замазки на характеристики асинхронных двигателей мощностью выше 100 кВт / *В.Н. Зиберов, Г.Н. Булатов* // *Электротехническая промышленность*. – 1971. – С.3 – 6.
65. *Хорий Е.Я.* Метод вибрационных воздействий при ускоренных испытаниях асинхронных двигателей на надежность / *Е.Я. Хорий, М.И. Гиль* // *Электротехника*. – 1971. – № 8. – С.4 – 6.

66. *Главный В.Д.* Результаты ускоренных испытаний на надежность электродвигателей типов ВАЛ и КОМ / *В.Д. Главный, М.И. Постернак, Н.Н. Ткачук* // Надежность и контроль качества. – 1971. – № 10. – С.35 – 42.

67. *Мариночкин В.П.* Стандартизация ускоренных методов испытания электрических машин на надежность / *В.П. Мариночкин, В.Т. Осипович, М.В. Резцова* // Электротехника. – 1971. – № 6. – С.61.

68. *Богуславский И.З.* Вопросы использования управляющих вычислительных машин для повышения надежности работы генераторов в условиях эксплуатации / *И.З. Богуславский, А.П. Сивков* // Высоковольтные турбо- и гидрогенераторы с непосредственным охлаждением. – М.: Наука, 1971. – С.208 – 215.

69. *Бернштейн Л.М.* Изоляция электрических машин общепромышленного применения / *Л.М. Бернштейн* // – М.: Энергия, 1971. – 367с.

70. *Куйбышев А.В.* Надежность асинхронных электродвигателей общепромышленного применения / *А.В. Куйбышев* // – М.: Изд-во стандартов, 1972 – 104с.

71. *Ковалев И.Ф.* Расчет надежности щеточного аппарата электрических машин / *И.Ф.Ковалев, Ю.С.Крыло* //Электротехническая промышленность. – 1972. – № 2. – С.7 – 9.

72. *Стамбулян Г.А., Яковлева С.В.* Повышение надежности обмоток при проектировании серий микроэлектродвигателей / *Г.А. Стамбулян, С.В Яковлева* // Электротехника. – 1972. – № 7. – С.38 – 41.

73. *Похолков Ю.П.* Оценка надежности витковой изоляции всыпных обмоток по дефектности провода / *Ю.П. Похолков, Э.К. Стрельбицкий*// Электротехническая промышленность. – 1972. – № 7. – С.19.

74. *Белова Л.А.* Сравнение повреждаемости корпусной изоляции турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением / *Л.А. Белова, Л.Г. Мамиконянц, В.Н. Тутубалин* // Электричество. – 1972. – № 8. – С.36 – 39.

75. *Дмитриевский В.С.* Вывод уравнения надежности электрической изоляции / *В.С. Дмитриевский* // Электротехника. – 1973. – № 1. – С.56 – 57.

76. *Лысаковский Г.И.* Повреждаемость и профилактика изоляции статоров генераторов типа ТВ2-100-2 / *Г.И. Лысаковский, А.Д. Мицай* // Электрические станции. – 1973. – № 8. – С. 73 – 75.

77. *Кравченко Г.Є.* Захист заглибних електронасосних агрегатів / *Г.Є. Кравченко, В.Ф. Яковлев* // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». Вип. 10. – Харків: ХДТУСГ, 2001. – С.512-514.

78. *Кравченко Г.Є.* Блок контролю фазних струмів станції керування та захисту заглибних електронасосних агрегатів / *Г.Є. Кравченко, В.Ф. Яковлев* // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». Вип. 10. – Харків: ХДТУСГ, 2002. – С.5.

79. *Черноусова Л.В.* Повышение эффективности защиты от перегрузки мощных двигателей / *Л.В. Черноусова, А.В. Зинченко* // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. – №3, – С.14 – 15.

80. А.с. 1251223 СССР, МКИ Н 02 Н 7/09. Устройство для защиты трехфазного двигателя от обрыва фаз / *А.К. Тищенко, П.И. Савченко, И.П. Белаи* // (СССР). – 1986, Бюл. № 30. – 3с.

81. *Тищенко А.К.* Защита электродвигателей вентиляционных установок с контролем тока в одной из фаз статорной обмотки / *А.К. Тищенко, П.И.Савченко* // 1-я межвузовская конференция «Многоскоростной автоматизированный электропривод в сельском хозяйстве» / Тезисы докладов. – Зерноград, 1992. – С.19 – 20.

82. А.с. 1675998 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты электродвигателя от аномальных режимов работы / *А.К. Тищенко, П.И. Савченко* // (СССР). – 1991, Бюл. № 33. – 4с.

83. А.с. 1056350 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты п трехфазных электродвигателей при опрокидывании / *В.В Овчаров, В.Н. Евтушенко, В.Я. Жарков* // (СССР). № 3422894/24-07; Заявлено 16.04.83, Опубл. 23.11.83, Бюл. № 43. – 3с.

84. А.с.1377956 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты п трехфазных электродвигателей при опрокидывании / *В.Я. Жарков, В.В. Овчаров, В.А. Мунтян* // (СССР). № 3988564/24-07; Заявлено 16.12.85, Оpubл. 29.02.88, Бюл. № 8.– 3с.

85. *Кобылянский А.В.* Тепловая защита электродвигателей / *А.В. Кобылянский, А.Е. Рубаненко, А.М. Шумский* // Энергетик. – 1987. – № 7. – С.31 – 32.

86. Пат. 237403 ГДР, МКИ Н 02 Н 3/08. Verfahren zur avtomatlschen und kontaktlosen Abschaltung eines erhohten Verbraucherstromes / *Oostreich Klaus* // – № 2763677; Заявлено 15.05.85, Оpubл. 09.07.86.

87. А.с. 1582262 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Способ токовой защиты асинхронного электродвигателя / *В.Ф. Минаков, Е.Ф. Минаков, И.А. Шихкеримов, С.Л. Кужеков* // (СССР). № 4467393/24-07; Заявлено 29.07.88, Бюл. № 28, 1990. – 4с.

88. А.с. 1568136 СССР, МКИ Н 02 Н 5/04, 7/08. Устройство для защиты группы электродвигателей от аварийных режимов / *А.Я. Чураков, В.Я. Жарков* // (СССР). №4474431/24-07; Заявлено 15.08.88, Оpubл. 30.05.90, Бюл. № 20. – 4с.

89. *Тубис Я.Б.* Температурная защита асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве / *Я.Б. Тубис, Г.К. Белов* // – М.: Энергия, 1977. – 104с.

90. *Богаенко И.Н.* Температурная защита асинхронных электродвигателей / *И.Н. Богаенко, Ю.В. Сердюк, М.А. Шатунов* // – Киев: Техника, 1987. – 94с.

91. А.с. 357644 СССР. МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для температурной защиты электродвигателя / *В.И. Васильченко, В.Б. Минько, Э.Ф. Романко, Б.С. Бабаккин, Я.Б. Тубис, Г.К. Белов* // (СССР). Оpubл.1972. Бюл. №33.

92. А.с. 363154 СССР. МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты асинхронного двигателя / *Я.Б. Тубис, Г.К. Белов, Е.Е. Некрасов, В.Л. Легнер* // (СССР). Оpubл. 1974. Бюл. № 11.

93. Protecting motors against running overcurrent / *Mc Partland James L. Elec. Contr. and Maint* // – 1987. – 86, № 6, P.26 – 29.

94. *Жарков В.Я.* Устройство для защиты от перегрузки группы электродвигателей с коррекцией по температуре / *В.Я. Жарков, А.Я. Чураков* // Электрификация и теплофикация с.х. процессов. – М.: АгроНИИТЭИИТО. – 1991. – № 4. – С.1 – 4.

95. Устройство встроенной температурной защиты типа УВТЗ-5. Руководство по эксплуатации. – Нальчик: НЗПП, 1988 – 8 с.

96. *Жарков В.Я.* Устройство для температурной защиты нескольких электродвигателей // Электрификация и теплофикация с.х. процессов / *В.Я. Жарков, А.Я. Чураков* // – М.: АгроНИИТЭИИТО. – 1990. – № 3. – С.6 – 9.

97. *Жарков В.Я.* Разработка устройства для групповой температурной защиты электродвигателей // Тезисы конференции «Многоскоростной и электронизированный электропривод в с.х.» / *В.Я. Жарков, А.Я. Чураков, А.М. Королев* // – зерноград, 1992. – С.17-18.

98. *Жарков В.Я., Плотников Е.Г.* Цифровой индикатор номера перегретого электродвигателя // Электрификация и теплофикация с.х. процессов / *В.Я. Жарков, Е.Г. Плотников* // – М.: АгроНИИТЭИИТО. – 1990. – № 3. – С.13 – 17.

99. Основы научных исследований / *В.И. Крутова, В.В. Попова* // – М.: Высш. шк., 1989. – 128с.

100. Патент 42932 А Україна, МПК⁷ G01K7/16. Пристрій для телеконтролю температури / *І.О. Попова, А.В. Жарков* // (Україна). – № 2000020610; Заяв.04.02.2000; Опубл.15.11.2001, Бюл. № 10.

101. *Рожавский С.М.* Несимметричные режимы работы сельскохозяйственных электрических сетей 380/220 В / *С.М. Рожавский* // – М.:МИИСП, 1970. – 55с.

102. *Паперно Л.Б.* Защита электродвигателей от работы в несимметричных режимах / *Л.Б. Паперно, М.М. Шумяцкий* // – Рига: ЛатНИИНТИ, 1980. – С.7 – 10.

103. *Кобзистый О.В.* Совершенствование защиты электродвигателей от несимметрии питающего напряжения: Автореф. дис...канд. техн. наук. Азово-Черноморская государственная агроинженерная / *О.В. Кобзистый* // академия.– Зеленоград, 2000. – 24с.

104. *Жарков В.Я.* Диагностика режимів роботи та захисту електродвигунів в АПК / *В.Я. Жарков, І.О. Попова* // – Деп. В ДНТБ України 27.07.2000, № 158. Ук.2000. – 110с.

105. *Данилов В.Н.* Классификация устройств защиты электродвигателей от аварийных режимов // *Механизация и электрификация сельского хозяйства* / *В.Н. Данилов* // – 1987. – № 6. – С.34 – 37.

106. *Данилов В.Н.* Защита электродвигателей от аварийных режимов// *Техника в сельском хозяйстве* / *В.Н. Данилов* // – 1988. – № 2. – С.19-22.

107. *Попова И.А.* Влияние асимметрии приложенного напряжения на работу асинхронного двигателя / *И.А. Попова* // Сб. науч. трудов ТГАТА. – 1997. – Вып.1,Т.3 – С.23 – 27.

108. А.с. 1580479 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от обрыва фаз / *Ф.Н. Сихиди, Г.И. Поляков, В.И. Горбунов* // № 4343178/24-07; Заявлено 22.10.87, Бюл. № 27, 1990. – С.252.

109. Реле защиты / *В.С. Алексеев, Г.П. Варчанов, Б.И. Панфилов, Р.З. Розенблюм* // – М.: Энергия, 1976. – 464с.

110. Реле контроля трехфазного напряжения ЕЛ-10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Внешторгиздат. – 6с.

111. *Петько В.Г.* Устройство для защиты трехфазных электродвигателей от асимметрии питающего напряжения // *Механизация и электрификация сельского хозяйства* / *В.Г. Петько, А.В. Садчиков* // – 2002. – № 10. – С.23 – 24.

112. *Мазуха А.П.* Защита двигателей при обрыве фазы // *Техника в сельском хозяйстве* / *А.П. Мазуха* // – 1987. – № 7. – С.52.

113. А.с. 1582260 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от неполнофазного режима и обратного чередования фаз / *В.Я. Жарков, А.Я. Чураков* // (СССР). № 4441059/24-07; Заявлено 12.05.88, Опубл. 30.07.90, Бюл. № 28. – 4с.

114. Пат. 238117 ГДР, МКИ G 01 R 29/16. Impedanznetzwerk fur Drehstromnetze zur Bildung eines Fehlersignals / *Hullmann Frank, Eckardt Gunter, Liegmann Klaus, Ullman Bernd* // – № 2771845; Заявлено 10.06.88; Опубл. 06.08.89.

115. Пат. 131645 ПНР, МКИ Н 02 Н 7/08. Elektroniczny undad zabezpieczaiacy przed zta koleinoscia lub drakiem faz obwodach pradu troifazowego / *Janues Marian, Gorajski Vichat, Zaktady Tworzyw* //

116. *Королев А.М.* Совершенствование устройства фазочувствительной защиты // Механизация и электрификация сельского хозяйства / *А.М. Королев* // – 1988. – № 2. – С.31.

117. *Попова І.О.* Математична модель режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруги / *І.О. Попова, В.В. Овчаров* // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Вип.5. – Мелітополь:ТДАТА, 2002. – С.11–18.

118. Патент 50344 А Україна, МПК⁷ Н02Н7/09. Пристрій захисту електродвигунів при несиметрії напруги / *І.О. Попова, А.Я. Чураков* // (Україна). – № 2001128981; Заяв.25.12.2001; Опубл.15.10.2002, Бюл. № 10.

119. *Мартиненко И.И.* Проектирование систем автоматики / *И.И. Мартиненко, В.Ф. Лисенко* // М.: Агропромиздат, 1990. – 243с.

120. *Савченко П.И.* Устойчивость электропривода при аварийном снижении напряжения. // Питання електрифікації сільського господарства / *П.И. Савченко, М.В Худобин* // Ювілейний науковий збірник ХДТУСГ. – Харків: ХДТУСГ, 1998. – С.163 – 165.

121. *Савченко П.И.* Методика определения влияния отклонений напряжения на эффективность функционирования технологических процессов сельскохозяйственного производства. // Питання електрифікації сільського господарства / *Савченко П.И.* // Ювілейний науковий збірник ХДТУСГ. – Харків: ХДТУСГ, 1998. – С.240 – 242.

122. *Савченко П.И.* Пути повышения эффективности эксплуатации электрооборудования на малых сельскохозяйственных предприятиях // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» / *П.И. Савченко, А.В. Уваров* // – Вип.6. – Харків: ХДТУСГ, 2001. – С.31 – 35.

123. *Савченко П.И.* Предварительная диагностика контактных соединений / *П.И. Савченко, А.В. Уваров* // Энергетика и электрификация. – № 8, 2001. С.31 – 35.

124. *Савченко П.И.* Анализ базовых методов и средств диагностирования электрооборудования сельскохозяйственного назначения / *П.И. Савченко, А.В. Уваров* // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Вип.10. – Харків: ХДТУСГ, 2002. – С.203 – 216.

125. *Савченко П.И.* Устройство для регистрации замыканий ротора обмотку статора / *П.И. Савченко, А.В. Уваров* // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Вип.8. – Мелітополь:ТДАТА, 2002. – С.13 – 14.

126. *Савченко П.И.* Підвищення ефективності експлуатації енергетичного електрообладнання сільськогосподарських підприємств / *П.И. Савченко, О.В. Мірошник, І.М. Трунова* // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – № 1, 2003. – С.75 – 78.

127. *Овчаров С.В.* Диагностирование энергетических показателей асинхронных двигателей // Техника в сельскохозяйственном производстве / *С.В. Овчаров, Т.В. Нахаева* // Труды. Таврическая государственная агротехническая академия – Мелитополь: ТГАТА. – Т.1. – 1999. – С.8.

128. *Вовк А.Ю.* Диагностирование асинхронных двигателей при помощи круговой диаграммы // Техника в сельскохозяйственном производстве / *А.Ю. Вовк, С.В. Овчаров* // Труды. Таврическая государственная агротехническая академия – Мелитополь: ТГАТА. – Вып.1, Т.3. – 1997. – С.97 – 100.

129. *Овчаров С.В.* Дослідження симетричних складових асиметричної напруги на затискачах електродвигуна / *С.В. Овчаров* // Праці. Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.1, Т.17. – 2000. – С.8 – 10.

130. *Овчаров С.В.* Порівняльна характеристика режиму роботи асинхронного електродвигуна при автономному живленні та об'єднанні нульових точок / *С.В. Овчаров* // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Вип.6. – Харків: ХДТУСГ, 2001. – С.376 – 377.

131. *Овчаров С.В.* Комп'ютерна система функціонального діагностування асинхронного електродвигуна / *С.В. Овчаров, І.І. Соловійов* // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.8. – 2002. – С.98 – 100.

132. *Овчаров В.В.* Поліпшення роботи асинхронних електродвигунів поточних технологічних ліній в аномальних режимах / *В.В. Овчаров, С.В. Овчаров* // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.6. – 2002. – С.7 – 11.

133. *Овчаров С.В.* Діагностування та захист електродвигунів поточної технологічної лінії за температурою сталі / *С.В. Овчаров* // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.9. – 2002. – С.82 – 85.

134. *Овчаров С.В.* Сила струму, споживаного електродвигуном, як діагностичний параметр / *С.В. Овчаров* // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – № 4, 2003. – С.50 – 55.

135. *Овчаров С.В.* Пристрій контролю дії надструмів групи асинхронних електродвигунів / *С.В. Овчаров* // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХДТУСГ, 2003. – С.279 – 284.

136. *Савченко П.І.* Графоаналітичний метод визначення механічних координат системи “АД – робоча машина” в перехідних і усталених режимах роботи // Електрифікація та автоматизація сільського господарства / *П.І. Савченко, С.В. Овчаров, О.В. Уваров* // – № 5, 2004. – С.50 – 55.

137. *Назарьян Г.Н.* Энергосберегающая САР режима установки кормоприготовления с настраиваемой моделью / *Г.Н. Назарьян, И.Д. Труфанов, А.В. Пирожок, И.А. Андрияс* // *Праці / Таврійська державна агротехнічна академія.* – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.6. – 2002. – С.7 – 11.

138. *Труфанов И.Д.* Теоретические аспекты моделирования экспертных энергосберегающих систем // *Проблемы автоматизированного электропривода / И.Д. Труфанов, В.И. Бондаренко, И.А. Андрияс, С.Р. Мохамад, Ю.Э. Пачколин* // *Теория и практика* // *Вестник национального технического университета «ХПИ»: Труды ХНТУ «ХПИ».* – Вып.10. – Харьков, 2001. – С.6.

139. *Кравченко А.Н.* Стохастический анализ и синтез параметров энерготехнологического оборудования в условиях резкопеременных нагрузок / *А.Н. Кравченко, И.Д. Труфанов, В.П. Метельский* // *Технічна електродінаміка: Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”, частина 6.* – Київ, 2000. – С.55 – 60.

140. *Трунова И.М.* Регулирование напряжения на вводе в сельскохозяйственное помещение / *И.М. Трунова, М.И. Гончар, А.А. Ясько* // *Збірник наукових праць Харківського Державного технічного університету сільського господарства.* – Харків: ХДТУСГ, 1998. – С.204 – 208.

141. *Трунова И.М.* Определение характера потребляемого из сети тока смешанной нагрузкой электрифицированных технологических установок / *И.М. Трунова* // *Збірник наукових праць Харківського Державного технічного університету сільського господарства.* – Харків: ХДТУСГ, 1998. – С.204 – 208.

142. *Савченко П.И.* Применение ЭВМ для определения оптимального напряжения при использовании местного автоматического регулирования напряжения для технологических процессов сельскохозяйственного производства / *П.И. Савченко, И.М. Трунова* // *Труды международной конференции “Автоматизация производственных процессов в сельском хозяйстве”.* – Минск: БАТУ, 2000. – С.57 – 59.

143. *Савченко П.І.* Технічні засоби раціонального використання електроенергії в технологічних процесах сільськогосподарського виробництва / *П.І. Савченко, І.М. Трунова* // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Вип.6. – Харків: ХДТУСГ, 2001. – С.427 – 430.

144. *Трунова І.М.* Пропозиції щодо вдосконалення методики планування технічної експлуатації енергетичного обладнання сільськогосподарських підприємств / *І.М. Трунова* // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Вип.6. – Харків: ХДТУСГ, 2003. – С.134 – 138.

145. *Корчемний М. О.* Розрахунок потужності електродвигунів для привода сільськогосподарських машин із випадковим навантаженням / *М. О. Корчемний* // Вісник сільськогосподарської науки. – 1982. – №7. – С.48–52.

146. *Krygier J.* Silniki energooszczedne, wlasciwosci, oszczednoze energii / *J. Krygier* // Materiały: XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych “Wspolczone problemy maszyn indukcyjnych” SME’94. 1994. – S/228–292.

147. *Корчемний Н. А.* Оптимизация параметров регулируемого электропривода пастоизготовителя / *Н. А. Корчемни., В. А. Дацышин* // Создание выскопроизводительных средств механизации в животноводстве. Научные труды ВНИП-ТИМЭСХ. – Зерно град, 1990. – С.145–148.

148. *Корчемний Н. А.* Повышение экономической эффективности кормоцехов при автоматизации поточных линий дозирования кормов / *Федорейко В. С., Гаран Е. В.* // Труды научно-практической конференции «Повышение роли молодых ученых и специалистов в совершенствовании экономического механизма хозяйствования». – Одеса. – Вып.4, 1988. – С. 10–12.

149. *Корчемний М. О.* Оптимізація структури і режимів роботи електроприводів сільськогосподарських машин / *М. О. Корчемний, В. С. Федорейко* // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2000. –Т.5. – №1. – С. 74–80.

150. *Лезнов Б. С.* Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках / *Б. С. Лезнов* – М.; ИК «Ягорба». – «Биоинформсервис», 1998. – 179 с.
151. *Ильинский Н. Ф.* Некоторые аспекты развития промышленного электропривода переменного тока / *Н. Ф. Ильинский* // *Электротехника*. – 1993. – №6. – С. 3–5.
152. *Веденяпин Г.В.* Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / *Г.В. Веденяпин*. – М.: Колос, 1973. – 199 с.
153. *Назарьян Г.Н.* Практический курс планирования эксперимента: учебное пособие / *Назарьян Г.Н.* – Мелитополь: ТГАТА, 1999. – 66 с.