

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

М. О. Реуцький,
М. А. Коваленко,
І.В. Ткачук,
О.В. Вишневський

Енергозбереження потужних електромеханічних комплексів

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Електричні машини і апарати»
спеціальності G3 «Електрична інженерія»

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

УДК 621.313: 62-83: 620.92

Автори: Реуцький Микола Олександрович, **канд. техн. наук., доцент**
Коваленко Михайло Анатолійович, **канд. техн. наук., доцент**
Ткачук Ігор Валерійович, *PhD, асистент*
Вишневський Олексій Володимирович, *асистент*.

Рецензент: Островерхов М.Я., докт. техн. наук, професор, кафедри «Теоретична електротехніка», Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського».

Відповідальний редактор: Цивінський С.С., **канд. техн. наук, доцент**.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 03.04. 2026 р.) за поданням вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 9 від 30.03.2026 р.).

Коваленко М.А. Енергозбереження потужних електромеханічних комплексів: вказівки до виконання практичних занять [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів освітньо-професійного ступеня магістр за освітньою програмою “Електричні машини і апарати” спец. G3 «Електрична інженерія» / М.О. Реуцький, М. А. Коваленко, І.В. Ткачук, О.В. Вишневський, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 120 с.

Подано матеріал до виконання практичних занять з дисципліни «Потужні електромеханічні комплекси та енергозбереження при їх експлуатації». В посібнику викладено матеріал, що дозволяє закріпити отримані під час вивчення лекційного курсу теоретичні знання, зокрема щодо конструкції, принципу дії, основних енергетичних параметрів та характеристик потужних комплексів на основі електромеханічних перетворювачів енергії.

Реєстр. 25/26-290. Обсяг 4,26 авт. арк.
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції ДК № 5354 від
25.05.2017р.

3мiCT

Список умовних скорочень	5
Передмова	6
1. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ.....	7
1.1 Техніка безпеки при проведенні практичних занять.....	7
1.2 Підготовка і допуск до практичних занять.....	7
1.3.Індивідуальні завдання	7
1.4. Контроль та рейтингова система оцінювання (PCO)	8
2.КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТЕОРІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ	10
2.1 Енергетичні системи електромеханічних комплексів.....	10
2.2 Умови створення енергозбережних моделей	14
P_2 P_1	15
2.3. Втрати активної потужності та ККД трансформаторів.	19
2.4. Вплив реактивних струмів на властивості трансформаторів.	25
2.5 Ефективність компенсації реактивної потужності в трансформаторах.	28
2.6. Регулювання первинної напруги трансформаторів.....	33
2.7. Оцінки ефективності регулювання виробничих трансформаторів.....	39
3. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.....	44
3.1 Особливості експлуатації асинхронних двигунів.....	44
3.2 Умови створення аналітичних моделей асинхронних двигунів	50
3.3. Мінімізація втрат активної потужності в асинхронних двигунах	54
3.4 Врахування впливу реактивних струмів на енергозбережні властивості асинхронних двигунів.....	58
3.5 Ефективність енергозбережного регулювання напруги в асинхронних дигунах	64
4. Методи енергозбереження місцевим підвищенням якості електроенергії	72
5. САМОСТІЙНА РОБОТА СТУДЕНТІВ.....	77
5.1 Вказівки по вибору тем	77
5.2 Розрахунок електроприводного комплексу.....	78
5.2.1 Технічне завдання на розрахунок ЕМК.....	78

5.2.2 Розрахунок потужності електродвигунів	79
5.3 Режими роботи електричних машин.....	86
5.4 Перевірка правильності вибору електродвигунів для різних режимів роботи.....	89
5.4.1 Перевірка вибору потужності електродвигуна при тривалому номінальному режимі роботи і сталому навантаженні.....	90
5.4.2 Перевірка вибору потужності електродвигуна при тривалому режимі роботи і змінному навантаженні	90
5.4.3 Перевірка вибору потужності електродвигуна при короткочасному режимі роботи	93
5.4.4 Перевірка вибору потужності електродвигуна при повторно-короткочасному режимі роботи	95
5.4.5 Перевірка стійкості роботи електродвигуна у періоди максимального навантаження.....	97
5.5 Розрахунок пускових і гальмівних пристроїв електродвигунів.....	98
5.5.1 Електродвигуни постійного струму паралельного і незалежного збудження	98
5.5.2. Пускові пристрої АД	101
5.6 Розрахунок перехідних режимів роботи тягового електродвигуна постійного струму послідовного збудження.....	103
5.7 Визначення тривалості пуску і часу зупинки електроприводів	106
5.8 Визначення перерізу проводів і кабелів	107
5.9 Розрахунок робочих характеристик трансформатора	107
5.10 Розрахунок зниження напруги у мережі при пусках електродвигунів ..	109
5.11 Розрахунок робочих характеристик АД з короткозамкненим ротором .	110
5.12 Вибір апаратури регулювання і захисту	112
ДОДАТОК.....	114
Список літератури	115

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕМК	-	електромеханічний комплекс
АД	—	асинхронний двигун
АМ	—	асинхронна машина
МПС	—	машина постійного струму
ЕМ	—	електрична машина
ПК	—	персональний комп'ютер
ПрЕЕ	—	Перетворювач електричної енергії
РЕЕ	—	Регулятор електричної енергії
КЕЕ	—	Комутатор електричної енергії
ТП	—	Технологічний пристрій
ДЕЕ	—	Джерело електричної енергії
СПЕ	—	Спеціалізований споживач електричної енергії

ПЕРЕДМОВА

В сучасних умовах на виробництвах необхідні спеціалісти, які знають не лише властивості енергетичного електромеханічного обладнання для забезпечення технологічних процесів – електричних двигунів різних видів і модифікацій, трансформаторних пристроїв загального і спеціального призначення, генераторів, що входять до складу технологічних електромеханічних комплексів. Вони також повинні знати взаємозв'язки енергетичного обладнання з апаратами інших систем таких електромеханічних комплексів: систем регулювання, систем керування, систем захисту. Спеціалісти-електромеханіки також мають бути обізнаними з основними сучасними виробничими технологіями, оскільки певним технологіям притаманні специфічні електромеханічні комплекси, а разом з тим і відповідні електромеханічні енергетичні пристрої.

Для більшості випускників експлуатація виробничих електромеханічних комплексів повинна розглядатися, як основний об'єкт їх професійної діяльності. Тому в сучасних умовах основні питання енергозбережної експлуатації електромеханічних пристроїв необхідно вивчати на аналітичних, технічних і економічних рівнях. Кожен з основних напрямків експлуатації має бути цілеспрямовано проаналізованим з тим, щоб відшукати та запровадити найбільш ефективні методи енергозбереження для конкретних виробничих умов.

Метою даної дисципліни є аналіз, знаходження методів і критеріїв та сучасних рекомендацій по використанню ресурсних можливостей електричних машин і трансформаторів для зниження втрат електричної енергії при їх експлуатації. Дисципліна побудована на основі аналізів процесів, які відбуваються в електричних машинах і трансформаторах при їх експлуатації на виробництвах. Побудовані відповідним чином моделі та їх аналізи спрямовані на знаходження критеріїв і взаємозв'язків, які визначають енергозбереження в конкретних величинах, а в умовах реально існуючих цін – економічний ефект у грошовому вимірі.

Основною метою практичних занять є підвищення ролі самостійних практичних розробок студентів та їх спеціальної електромеханічної виробничої підготовки; розвиток у студентів навичок самостійної інженерної роботи відповідно до підприємств з широким профілем виробництва шляхом розробки сучасних виробничих електромеханічних комплексів (ЕМК) і систем для відповідних технологій та їх енергозбережної експлуатації.

1. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

1.1 Техніка безпеки при проведенні практичних занять

Оскільки більшість практичних занять проходить в лабораторії, то студенти, що вперше приходять в лабораторію, зобов'язані прослухати інструкцію з техніки безпеки, дотримання якої є обов'язковим впродовж усього циклу практичних занять.

Враховуючи, що в лабораторії використовується напруга 220 В змінного струму, а опір тіла людини становить близько 500 Ом, зазначені величини напруги є небезпечними.

У випадку ураження струмом, обриву дротів, які знаходяться під напругою, потрібно негайно відключити напругу.

Невиконання правил техніки безпеки може призвести до травм, виходу з ладу комп'ютерної техніки та електромеханічного обладнання..

Додаткові інструкції з техніки безпеки по кожній конкретній практичній роботі надаються викладачем.

1.2 Підготовка і допуск до практичних занять

Підготовка і допуск до практичних занять. На ввідному занятті студент повинен ознайомитися з інструкцією по техніці безпеки при роботі в лабораторії, з устаткуванням, з вимогами по допуску до роботи та її проведення. Підготовка полягає в усвідомленні студентом мети і завдань практичної роботи.

Перед заняттям студент повинен вивчити основні теоретичні положення по темі практичної роботи, програму роботи, мати з собою флеш-пам'ять для запису змісту практичної роботи і мати можливість продовжити почату роботу наступного разу.

Допуск студента до заняття здійснюється після індивідуальної бесіди з викладачем. Студенти, що не пройшли інструктаж з техніки безпеки і не підготувалися до практичної роботи, до занять не допускаються.

1.3.Індивідуальні завдання

Для підвищення ефективності одержуваних студентами знань та вміння їх використовувати в практичній діяльності, важлива роль при вивченні дисципліни відводиться самостійній та індивідуальній роботі. Важливо викликати зацікавленість у студента не тільки до дисципліни, але і до навчання взагалі, щоб прагнення до навчання стало у нього природною потребою.

З метою розширення знань студентів про можливі напрямки застосування та особливості практичних задач енергозбереження в окремих виробничих електромеханічних комплексах кожен студент виконує індивідуальне домашнє завдання за однією з наступних тем:

- вдосконалення вибору електромеханічного обладнання для обраного технологічного устаткування в нерегульованому електроприводі;
- перехід на енергозберігаюче обладнання поліпшеної конструкції, яке має підвищені значення ККД та $\cos \varphi$;
- виключення проміжних передач в регульованому електроприводі та застосування групового, одиночного та багатодвигунного приводу;
- підвищення ефективності виконання технологічних процесів;
- вибір раціональних режимів експлуатації електропривода;
- покращення якості електроенергії.

При цьому об'єктом дослідження є виробничий електромеханічний комплекс, особливості функціонування якого вивчалися кожним студентом в межах виконання індивідуального семестрового завдання, а перелік питань, що підлягають розробці, залежить від виду обраного електромеханічного комплексу (з регульованим або нерегульованим електроприводом, для реалізації електрофізикохімічних технологій, тощо). Структура завдання наведена в додатку А.

1.4. Контроль та рейтингова система оцінювання (РСО)

Поточний контроль: експрес-опитування,, розв'язання задач

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Загальна рейтингова оцінка студента після завершення семестру складається з балів, отриманих за:

- відповіді під час проведення експрес-опитувань на лекціях;
- роботу на практичних заняттях;
- виконання індивідуальної роботи (СРС);

<i>Експрес-опитування</i>	<i>Практичні заняття</i>	<i>Індивідуальна домашня робота</i>	<i>R_c</i>	<i>R_{екз}</i>	<i>R</i>
4	6	50	60	40	100

Робота на практичних заняттях

Ваговий бал – 1,0.

Максимальна кількість балів на всіх практичних заняттях –
1,0 бали * 8 = 8 балів.

Критерії оцінювання

- самостійне розв'язання задачі, вільне володіння темою заняття – 1,0;
- розв'язання задачі за допомогою викладача, володіння окремими розділами теми заняття – 0,5;

Індивідуальне семестрове завдання (СРС)

Згідно з робочою навчальною програмою кожен студент виконує розрахунково-графічну роботу. Максимальна кількість балів за виконання СРС – 50.

Критерії оцінювання

- повне, точне і вчасне виконання, доповідь та презентація роботи – 50 балів;
- розрахунок неточний є окремі несуттєві помилки – 30-40 балів;
- розрахунок неповний, є окремі суттєві помилки – 20-30 балів;
- розрахунок неправильний, несвоєчасне виконання роботи – 0 балів;

на виконання СРС відведено 4 тижні з моменту видачі завдання; здача СРС після встановленого терміну передбачає нарахування штрафного балу -10 за кожен тиждень понад встановлений термін.

Календарний контроль базується на поточній рейтинговій оцінці. Умовою позитивної атестації є значення поточного рейтингу студента не менше 50% від максимально можливого на час атестації.

2.КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТЕОРІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

2.1 Енергетичні системи електромеханічних комплексів

Енергетичною основою переважної більшості виробничих технологічних засобів і пристосувань є електроенергетичні перетворювачі енергії. Для дії будь-якого технологічного пристрою (ТП) потрібен певний вид енергії; механічної енергії - для верстатів механічної дії, механізмів інших пристосувань; теплової енергії - для термічних технологій, пов'язаних з плавленням або нагріванням металів, сушінням та інші; радіаційної енергії - для освітлювальних приладів та джерел інших видів енергетичного випромінювання; спеціальних видів електричної енергії - підвищеної або зниженої частоти, імпульсної, випрямленої та ін.

Для отримання необхідних для виробничих процесів видів енергії використовують здебільшого загальні джерела електричного живлення у вигляді понижувальних трансформаторів загального призначення і користування джерел електричної енергії (ДЕЕ), первинні сторони яких з'єднані з загальною електроенергетичною мережею змінного струму частотою 50 Гц. Від цих трансформаторів ДЕЕ живляться безпосередні стандартні перетворювачі електричної енергії (СПЕ) у потрібний для певної технології вид, тобто СПЕ - це споживачі - перетворювачі електроенергії зі стандартними характеристиками у інший вид енергії з певними характеристиками, можливо навіть і у електричну, але з нестандартними характеристиками. Цю перетворену енергію отримує технологічний пристрій (ТП) безпосередньо, а інколи через передавальний пристрій (ПП). На малюнку 2.1 показана принципова модель згаданих енергетичних елементів у структурі електромеханічного комплексу.

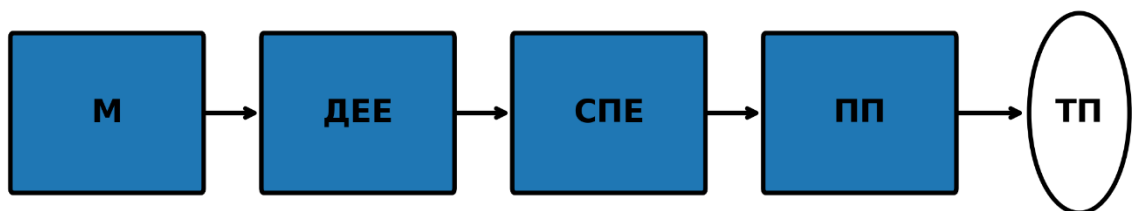


Рисунок 2.1 – Енергетична система ЕМК

Таким чином, типова енергетична система в загальній структурі ЕМК включає до себе першочергово сам технологічний пристрій ТП, для найкращої діяльності якого створюють певний ЕМК. Через передавальний пристрій ПП технологічний пристрій ТП отримує необхідний різновид енергії з потрібними характеристиками від споживача - перетворювача електричної енергії СПЕ, який перетворює електроенергію змінного струму зі стандартними

характеристиками, отриману з мережі машиною (М) через трансформатор загального користування ДЕЕ.

Для найбільш поширених на виробництвах технологічних пристроїв ТП механічної дії (механічні технології) потрібну їм механічну енергію постачають СПЕ у вигляді електричних двигунів з певними характеристиками. Найчастіше це є асинхронні двигуни потрібної потужності і модифікації, інколи - відповідні синхронні двигуни; вони живляться безпосередньо від трансформаторів ДЕЕ. Якщо використовують двигуни постійного струму, то живлення їх необхідно забезпечити від проміжного перетворювача змінного струму у випрямлений. Такі електромеханічні комплекси по перетворенню електричної енергії в механічну за допомогою електричних двигунів звичайно називають електроприводними.

На сучасних виробництвах чим далі більше використовують ТП не лише на базі застосування механічної енергії, але й інших видів. Так, термічні технології своєю енергетичною базою мають відповідні СПЕ, які перетворюють електроенергію зі стандартними характеристиками в її інші різновиди - з потрібними рівнями напруги, нерідко й частоти, а інколи і форми зміни в часі. Такі спеціальні різновиди використовують для певних електротермічних ТП - електродугових високочастотних і надвисокочастотних, імпульсних та ін.

В такому випадку СПЕ може бути представлений традиційною двомашинною системою Г-Д, але в сучасних умовах вона є занадто застарілою. Зараз для потрібних перетворювань застосовують переважно статичні електромеханічні пристрої у вигляді спеціальних трансформаторів (електропічних, електрозварювальних) або перетворювачів електричної енергії на базі спеціалізованих трансформаторних пристроїв та сучасних керованих напівпровідникових вентильних схем - імпульсні трансформатори, перетворювачі частоти та ін.

Подібні сучасні статичні електромеханотронні автономні СПЕ чим далі більше використовують не лише для різноманітних ТП термічної дії, але й для інших технологій - електроімпульсних, електрохімічних, електроаерозольних та ін. Узагальнено всі ці різновиди технологій нерідко називають електрофізикохімічними.

Всі ці енергетичні електромеханічні або електромеханотронні перетворювачі потрібно в процесі роботи вмикати, вимикати, регулювати. Для цього в електромеханічному комплексі створюють другу систему - регульовальну (Малюнок 2.2). Для загальної типової схеми регульовальна система представлена чотирма елементами: КЕЕ - комутатор електричної енергії; РЕЕ - регулятор електричної енергії; ПрЕЕ - перетворювач електричної енергії зі

стандартними характеристиками; а також ПП - передавальний пристрій в колі перетвореної енергії.

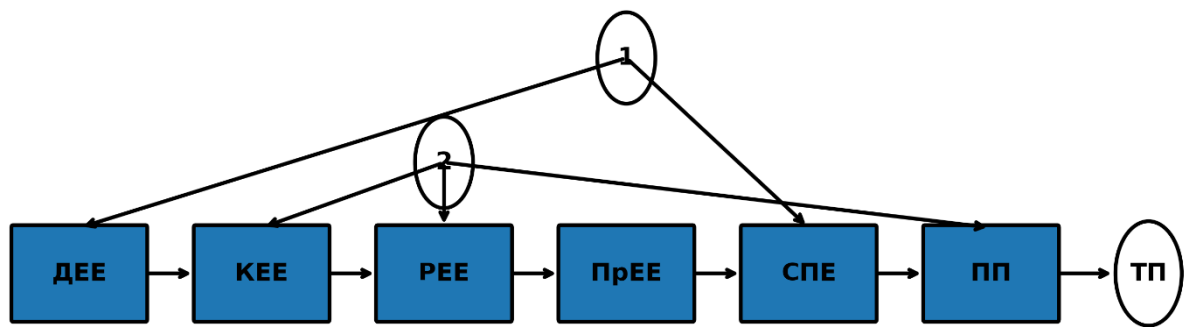


Рисунок 2.2 – Енергетична (1) та регулювальна (2) системи в типовій структурі електромеханічного комплексу

В електроприводних комплексах ПП - це традиційні механічні передачі (зубчасті, черв'ячні, клино-пасові, муфти ковзання та ін.) або сучасніші пристосування електромеханічного типу (електромагнітні муфти). В СПЕ для електрофізико хімічних технологій ПП представлені регуляторами у колах перетвореної енергії, наприклад, регулювальний дросель на виході електрозварювального трансформатора для електродугового зварювання. В сучасних ЕМК дію пристроїв КЕЕ, РЕЕ та ПрЕЕ нерідко поєднують в одному електромеханотронному перетворювально - регулювальна - комутаційному блоці.

Крім згаданих двох систем у виробничому ЕМК необхідно мати ще й інші структурні функціональні апаратні системи, зокрема, керувальну. За допомогою апаратів керувальної системи забезпечують дистанційне, частково автоматизоване або повністю автоматичне керування роботою ЕМК відповідно до певної програми функціонування ТП. В цих системах застосовують датчики електричних сигналів про рівні контрольованих величин, приймачі сигналів у вигляді приладів візуального контролю або логічних елементів щодо подальших дій системи керування, виконавчих пристроїв дистанційної дії та ін.

В складі цієї системи або у вигляді окремої четвертої необхідно створити також автоматичну систему захисту найбільш відповідальних складових елементів ЕМК, від дії небезпечних факторів - перевантажень, коротких замикань та інших небажаних проявів.

Виходячи з наведеної типової структури виробничого ЕМК при розробці певного вибраного комплексу необхідно виходити з відповідних конкретних умов щодо функціональної особливості даного ТП: потрібний для нього вид енергії та відповідні її характеристики (вид руху, швидкості, необхідні потужності та ін.); всі ці дані необхідно знати або обрати конкретно і надалі

внести у технічне завдання на розробку ЕМК. Далі слід визначитися з джерелом загального живлення ДЕЕ, його потрібно буде оцінити щодо можливості і доцільності використання. Найважливішим і відповідальним етапом у розробці ЕМК є вибір необхідного СПЕ на основі відомих вимог ТП; наявних можливостей ДЕЕ; доцільності та технічній досконалості певного СПЕ; економічної доцільності застосування такого СПЕ.

Найбільш типовою є задача по доцільному вибору електричного двигуна для даного механічного ТП. Для загальної частини курсового проекту у IX семестрі можна обмежитися аналізом та обґрунтуванням вибору конкретного двигуна:

- асинхронного, синхронного або постійного струму;
- обґрунтувати вибір його потужності;
- обґрунтувати вибір інших його властивостей (сфер застосування, кліматичного виконання, ступеню захищеності);
- визначити конкретний типорозмір;

після цього, на даному етапі проектування вважати такий вибір остаточним. Для орієнтації доцільно ознайомитися з матеріалами четвертого розділу цих методичних вказівок.

Подібним же чином необхідно обґрунтувати вибір певного СПЕ та ТП в обраній електрофізико хімічній технології. Для таких технологій теж необхідно основний аналіз і увагу приділити вибору автономного трансформаторного пристрою СПЕ - його потужності, основних властивостей забезпеченню потрібних режимів роботи. При цьому також слід оцінити можливості трансформатора ДЕЕ для забезпечення роботи СПЕ.

У відповідності до обраних основних електромеханічних енергоперетворювальних пристроїв СПЕ та ДЕЕ комплектують ланки енергетичних кіл від ДЕЕ до СПЕ та від СПЕ до ТП апаратами регулювання. В конкретних системах далеко не завжди використовують РЕЕ, ПП, а тим більше ПрЕЕ. Застосування тих чи інших апаратів теж слід обґрунтувати, а самі апарати вибрати за довідниковими або каталожними даними відповідно до умов функціонування ТП та змін у режимі роботи СПЕ.

Лише після цього слід вирішувати питання про обґрунтування тієї чи іншої системи керування в даному ЕМК. Вона може бути вирішена в загальних принципових позиціях і елементах, без їхньої деталізації і конкретного вибору. Ці питання більше стосуються фахівців з апаратури керування. Приблизно такі ж принципові підходи потрібні при виборі апаратури захисту. Додаткові відомості щодо вибору апаратури регулювання і захисту також наведені в четвертому розділі даних методичних вказівок.

В цілому ж слід мати на увазі, що основна мета розробки виробничого ЕМК - досягнення найвищої ефективності роботи ТП в заданих режимах. Тому весь енергетичний канал від ТП до ДЕЕ, системи регулювання, керування та

захисту проєктують, створюють і експлуатують так, щоб забезпечити не лише роботоспроможність, але й найвищу ефективність роботи ТП. Вибір інших цілей (наприклад, першочергова орієнтація на вид СПЕ, джерело загального живлення, апаратуру регулювання або керування) знижує ефективність роботи ЕМК або взагалі може бути хибним.

Тому друга спеціальна частина проєкту в Х семестрі має бути спрямованою на поглиблення розробок і подальше вдосконалення ЕМК. Істотно, що найбільші можливості щодо підвищення ефективності ЕМК та ресурсоенергозбереження при його експлуатації закладені у властивостях самого ТП та відповідного йому СПЕ. Наприклад, якщо певний ЕМК експлуатується при навантаженнях, що становлять 15...30 % від його номінальних можливостей, то необхідно змінювати або навантаження ТП, або відповідні структурні системи ЕМК. Якщо вважати властивості і рівні навантажень заданими, то слід далі вдосконалювати ЕМК.

В четвертому розділі наведені рекомендації і досить докладні методи щодо розрахунку електроприводного ЕМК, зокрема елементів його енергетичної системи. Цим питанням, а особливо розробці джерел безпосереднього живлення ЕФХ - технологій присвячується значна кількість спеціальних публікацій у вітчизняних та закордонних виданнях. Для орієнтації в кінці методичних вказівок наведено певний перелік таких видань. Для ще більш сучасного вдосконалення у кожному конкретному випадку потрібен спеціальний пошук відповідних джерел найновітнішої технічної інформації у періодичних виданнях, каталогах, бюлетенях, експрес-інформаціях та ін.

2.2 Умови створення енергозбережних моделей

Споживання енергії певного виду (електричної або механічної) та потреба в ній у вигляді активної потужності P_2 визначаються вимогами технологічного пристрою ТП. Тобто, вид енергії і величина її активної потужності P_2 є обумовленими, заданими. Їх необхідно забезпечити дією електромеханічного комплексу на виході основного споживально-перетворювального пристрою СПЕ спеціалізованого трансформатора (трансформаторного пристрою) або асинхронного двигуна.

В той же час рівень потужності P_2 , споживаний технологічним пристроєм ТП, може забезпечуватись пристроєм СПЕ при різних умовах і формах експлуатації електромеханічного комплексу. При цьому рівні втрат активної потужності в енергетичних каналах пристрою СПЕ також будуть різними.

Тому головною метою аналізів є відшукування можливостей і методів до максимального скорочення втрат електричної енергії в основних енергетичних

каналах СПЕ . Це означає відшукування методів зменшення сумарних втрат активної потужності Σp в певних режимах експлуатації споживально-перетворювального пристрою СПЕ.

Внутрішні структури енергетичних каналів СПЕ, обраних для аналізів, тобто трансформаторів та асинхронних двигунів з короткозамкненими роторами, показані на малюнок 2.3.

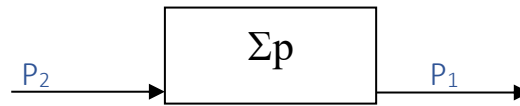


Рисунок 2.3 – Втрати в СПЕ

Вони складають послідовні ланцюги кіл проходження відповідних видів енергії:

- 1) вхідних (первинних)- електричної EE_1 ;
- 2) внутрішніх - магнітної $MagE$;
- 3) вихідних (вторинних)- електричної EE_2 в трансформаторах або механічної ME в асинхронних двигунах.

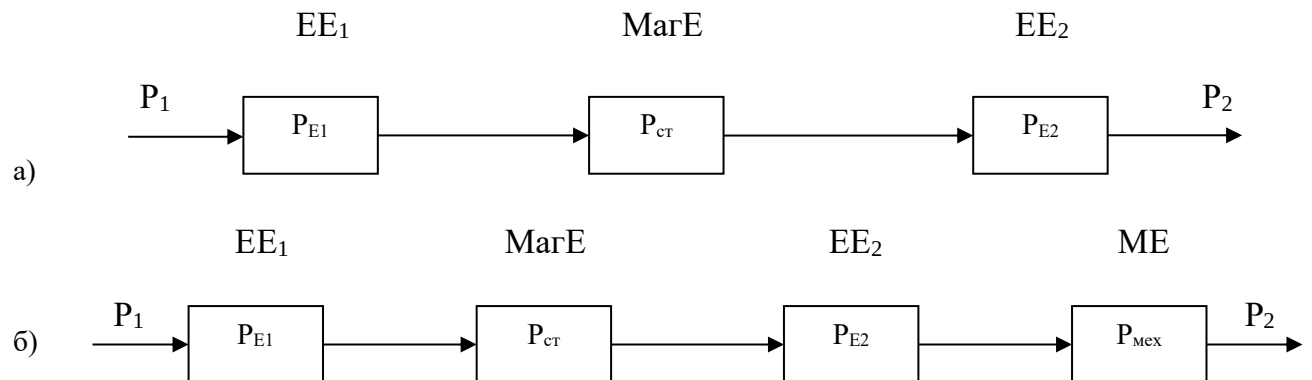


Рисунок 2.4 – Структури енергетичних каналів та втрат в них активної потужності:

а) трансформатора; б) асинхронного двигуна

При проходженні енергетичними каналами, частина енергії втрачається; відповідні втрати активної потужності:

- 1) в електричних колах p_E ;
- 2) в магнітних колах p_{ct} ;
- 3) в механічних p_{mex} .

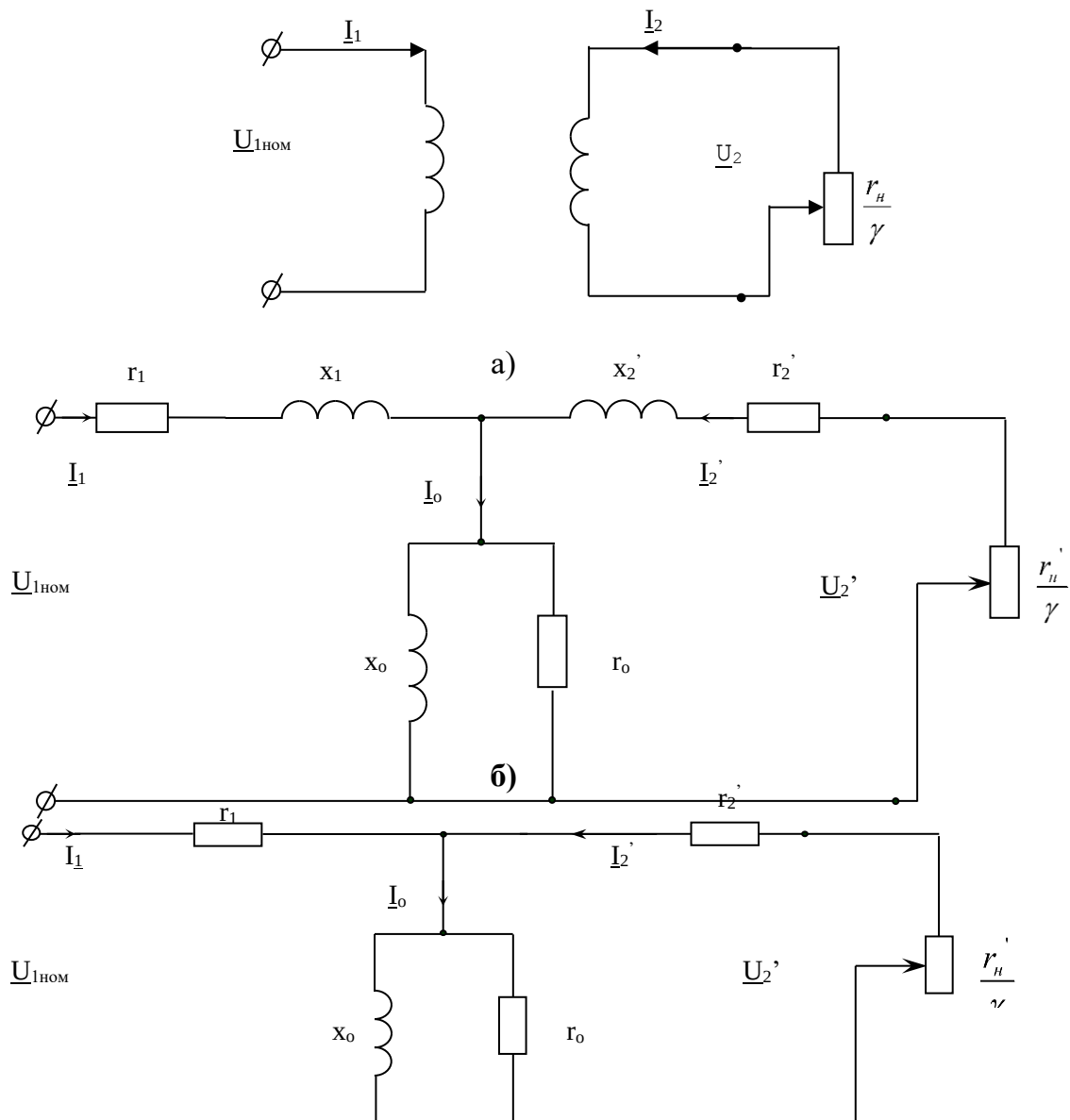
Різниця між споживаною активною потужністю P_1 , та відповідною до ТП потужністю P_2 складає сумарні втрати активної потужності Σp в СПЕ

$$\sum p = P_1 - P_2$$

Аналіз доцільно розпочати з більш простої моделі. Такою є однофазна модель трансформатора (рисунок 2.5).

За вихідну модель обрана фізична та відповідна їй зведена Т-подібна схема заміщення (рисунок 2.5, а, б) з паралельним з'єднанням активного r_0 та індуктивного X_0 опорів намагнічувального контуру; вона зручніша для аналізів. Для першого етапу аналізу обране чисто активне регульоване навантаження (регульовальний фактор γ) при $U_1 = U_{1ном} = \text{const}$.

Подальші моделі спрощуються для можливості користування ними при реальних розрахунках шляхом нехтування другорядними величинами, вплив яких на кінцеві результати є мало суттєвим. Зокрема, у виробничих трансформаторах загального призначення, індуктивні опори розсіювання X_1 та X_2' приблизно в 1000 разів менші від індуктивного опору взаємоіндукції X_0 , тому їх впливом можна знехтувати (рисунок 2.5, в).



в)

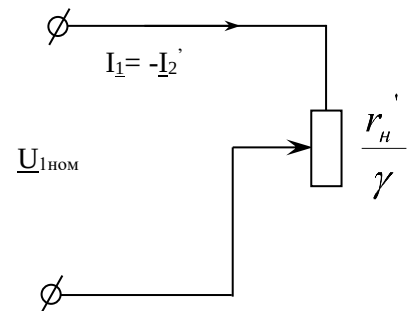
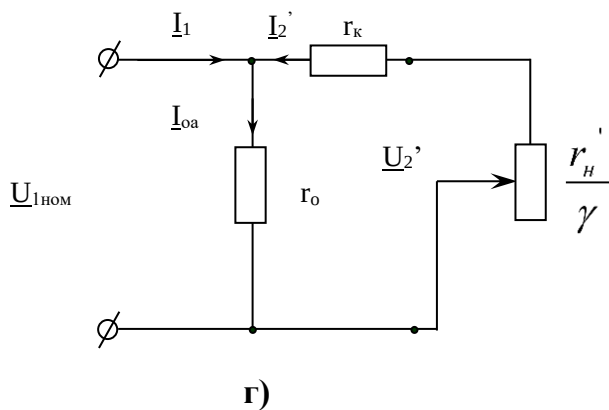


Рисунок 2.5 – Схеми заміщення (моделі) трансформатора: а) фізична; б) зведена Т-подібна; в) зведена спрощена; г) для розрахунків втрат активної потужності; д) для розрахунків первинного струму

В таких трансформаторах струм I_0 становить всього близько 2% від номінального струму $I_{1ном}$. Тому струмом I_0 також можна знехтувати. Тоді

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}_2'$$

$$r_1 + r_2' = r_k.$$

Струм I_1 визначається за моделлю по малюнок 2.5,д, в якій функціонує лише регульований внутрішній активний опір r_H'/γ , створюваний ТП. При відомих r_k та r_o можна тепер розрахувати з достатньою точністю втрати на цих опорах за моделлю по рисунку 2.5 г; вони відповідають електричним втратам p_E в обмотках та втратам в сталі $p_{ст}$.

Технологічний пристрій ТП принципово потребує споживання лише активної потужності P_2 . Споживання індуктивної реактивної потужності та відповідні реактивні струми є супутнім явищем в самому ТП або споживально-перетворювальному пристрої СПЕ. Особливо наочним це є в електроприводних електромеханічних комплексах, де ТП (механізм) споживає виключно активну потужність P_2 . Тому аналізи починаються з розгляду чисто активного навантаження. Впливи реактивних струмів далі розглядаються окремо, як впливи додаткових факторів в уточнених розрахунках.

Аналітичні моделі асинхронних двигунів є більш складним, в них вплив реактивного струму намагнічуючого контуру в середньому в 10...20 разів вищий, ніж в трансформаторах; переважно із-за наявності повітряного зазору

між статором і ротором. Тому нехтування ним, як це мало місце в трансформаторах, доцільне лише в самих простих моделях. При більш точних розрахунках вплив реактивного струму необхідно враховувати.

Сума втрат активної потужності в загальному випадку

$$\sum P = P_{E1} + P_{cm} + P_{E2} + P_{mex}.$$

Для трансформаторів втрати активної потужності в обмотках можна об'єднати

$$P_E = P_{E1} + P_{E2},$$

оскільки вони визначаються близькими за значеннями струмами I_1 та I'_2 . Величина цих втрат пропорційна квадрату струму незалежно від його характеру. В трансформаторах механічного кола в загальному енергетичному каналі немає, в них $P_{mex}=0$. В асинхронних двигунах втрати P_{mex} можуть складати досить суттєву частину сумарних втрат активної потужності $\sum p$.

Найбільш широко вживаним критерієм визначення відносної величини втрат активної потужності є коефіцієнт корисної дії (ККД)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

де P_2 звичайно є величиною відомою або заданою. Оскільки величини P_2 та P_1 є досить близькими за значеннями, то в минулому, при традиційних засобах обчислення, похибка обчислення ККД могла бути досить суттєвою. Для підвищення точності розрахунків ККД, створили спеціальну формулу

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}.$$

Саме формулою (2.7) користуються й дотепер. Істотно, що сучасні електронні засоби обчислення дозволяють розраховувати ККД за простішою формулою з високою точністю. Але формула визначення ККД закріпилася традиційно у навчальній літературі і навіть державних нормативах (стандартах). Тому вона залишається вихідною для всіх подальших аналізів і операцій з ККД.

Доцільно детальніше розглянути навантажувальні режими і ККД трансформатора СПЕ. Якщо в електрофізико хімічному ТП, що живиться від трансформатора СПЕ, внутрішній активний електричний опір $r_n = \text{const}$, то при незмінних характеристиках прикладеної напруги $U_1=U_2=\text{const}$ це відповідає найпростішій формі експлуатації електромеханічного комплексу – нерегульованій. При цьому віддавана трансформатором СПЕ потужність P_2 ,

втрати активної потужності Σp та споживана потужність P_1 залишаються сталими.

Необхідно з'ясувати й уточнити попередньо вихідні базові рівні навантаження трансформатора. Відпочатку аналізу слід прийняти за основний вид усталене навантаження, відповідне стандартному режиму S1. Як базу для визначення подальших змін доцільно взяти рівень найбільшого припустимого навантаження в режимі S1 - номінального режиму при чисто активному характері навантаження. При змішаному характері навантаження в номінальному режимі

$$P_{2ном} = U_{2ном} I_{2ном} \cos \varphi_{2ном} = S_{2ном} \cos \varphi_{2ном} ,$$

де $\cos \varphi_{2ном} = \cos \varphi_{нном}$ - відповідний характеру навантаження ТП в номінальному режимі; $S_{2ном}$ - повна (позірна) потужність вторинної сторони трансформатора в номінальному режимі, тобто при $U_1 = U_{1ном}$ та $I_2 = I_{2ном}$ незалежно від його характеру; саме $S_{2ном}$ вказується в технічних і довідкових даних трансформаторів. Тоді ККД трансформатора в номінальному режимі при змішаному характері навантаження

$$\eta_{ном} = 1 - \frac{\sum P_{ном}}{S_{2ном} \cos \varphi_{2ном} + \sum P_{ном}} .$$

Для номінального режиму при чисто активному навантаженні, тобто при $\cos \varphi_{2ном} = \cos \varphi_{нном} = 1$, $S_{2ном} = P_{2ном}$

$$\eta_{ном} = 1 - \frac{\sum P_{ном}}{S_{2ном} + \sum P_{ном}} ;$$

або навіть

$$\eta_{ном} = 1 - \frac{\sum P_{ном}}{P_{2ном} + \sum P_{ном}} .$$

Саме вирази і значення ККД в номінальному режимі при чисто активному характері навантаження слід вважати основними базовими значеннями ККД трансформаторів.

2.3. Втрати активної потужності та ККД трансформаторів.

Сумарні витрати активної потужності в трансформаторах визначаються двома основними складовими: втратами в сталі $p_{ст}$ та втратами в обмотках p_E . Вони суттєво залежать від ряду факторів. Зокрема для конкретного виробничого трансформатора їх розподіл закладений ще при проєктуванні та виготовленні трансформатора. Втрати активної потужності в цьому

трансформаторі при його експлуатації на виробництві суттєво залежать від її форми. Тому для аналізу першочергово необхідно обумовити форми експлуатації та специфіку розглядуваних трансформаторів.

Для основного аналізу доцільно взяти форми експлуатації, які найбільш широко використовуються на виробництвах. Цим вимогам відповідають умови: 1) $f_1=50\text{Гц}=\text{const}$; 2) $U_1=U_{1\text{ном}}=\text{const}$. При цих умовах найбільш широке застосування мають дві форми експлуатації:

практично нерегульована, притаманна всім трансформаторам загального користування ДЕЕ та значній частині автономних спеціалізованих трансформаторів СПЕ в складі електрофізико хімічних електромеханічних комплексів; регульована в трансформаторах СПЕ за допомогою $r_H=\text{var}$

Основним видом виробничих трансформаторів є трифазні масляні загального призначення. Найбільш широко вони використовуються як трансформатори загального користування. Разом з тим вони знаходять застосування в ряді електрофізико хімічних технологій як автономні трансформатори СПЕ. Необхідні для аналізів дані для номінальних режимів таких виробничих трансформаторів найбільш широкого використання типу ТМ наводяться в таблиці 2.1.

Споживана трансформатором активна потужність в режимі холостого ходу p_x - це втрати в сталі $p_{\text{стном}}$; споживана активна потужність в режимі короткого замикання p_k - це втрати в обмотках в номінальному режимі $P_{\text{Еном}}$. При $U_{1\text{ном}}=\text{const}$ втрати в сталі є сталими, незалежними від рівня навантаження

$$P_{\text{ст}\beta} = P_{\text{стном}} \cdot$$

Втрати активної потужності в обмотках пропорційні квадрату рівня струмового навантаження

$$P_{\text{Е}\beta} = P_{\text{Еном}} \beta^2.$$

Сумарні втрати активної потужності в трансформаторі в номінальному режимі при $\beta=1$

$$\sum p_{\text{ном}} = p_{\text{стном}} + p_{\text{Еном}}$$

при рівні струмового навантаження

$$\sum p_{\beta} = p_{\text{стном}} + \beta_i p_{\text{Еном}}$$

У попередній темі було з'ясовано, що рівень навантаження β залежить від форми експлуатації - нерегульованої або регульованої на досягнення в ТП певного рівня активної потужності $P_{2\beta}$.

Таблиця 2.1

Номінальні дані трансформаторів типу ТМ загального призначення

$S_{2\text{ном}}$ (кВ·А)	$U_{1\text{ном}}=10\text{кВ}$			$U_{1\text{ном}}=35\text{кВ}$		
	$p_{\text{стном}}$ (кВт)	$p_{\text{Еном}}$ (кВт)	i_0 (%)	$p_{\text{стном}}$ (кВт)	$p_{\text{Еном}}$ (кВт)	i_0 (%)
25	0,13	0,60	3,2	-	-	-
40	0,19	0,88	3,3	-	-	-
63	0,26	1,28	2,8	-	-	-
100	0,36	1,97	2,6	0,46	1,97	2,6
160	0,56	2,65	2,4	0,70	2,65	2,4
250	0,82	3,70	2,3	1,00	3,70	2,3
400	1,06	5,50	2,1	1,35	5,50	2,1
630	1,56	7,60	2,0	1,90	7,60	2,0

За нерегульованою формою експлуатації традиційно закріпилося користування рівнем струмового навантаження β_i . Як було з'ясовано в процесі аналізів для регульованого автономного трансформатора СПЕ доцільно визначати рівень активного навантаження β_p від базового номінального рівня активної потужності за (2.5). Зв'язок між цими навантажувальними рівнями за

$$\beta_i = \frac{\beta_p}{\cos \varphi_2},$$

вони співпадають лише при $\cos \varphi_2=1$.

В загальному випадку при змішаному характері навантаження значення ККД за, рекомендованої державними стандартами, з врахуванням викладеного вище для нерегульованої форми експлуатації трансформатора

$$\eta_i = 1 - \frac{P_{стном} + \beta_i^2 P_{Еном}}{\beta_i S_{2ном} \cos \varphi_2 + P_{стном} + \beta_i^2 P_{Еном}}.$$

Для регульованої форми експлуатації автономного трансформатора СПЕ з цільовим регулюванням потужності

$$\eta_p = 1 - \frac{P_{стном} + \beta_i^2 P_{Еном}}{\beta_p P_{2ном} + P_{стном} + \beta_i^2 P_{Еном}}.$$

Доцільно, як і раніше, основні аналізи провести при чисто активному характері навантаження; тоді

$$S_{2ном} = P_{2ном},$$

$$\beta_i = \beta_p$$

Відповідно однаковою загальною стає і залежність ККД від рівнів навантаження

$$\eta = 1 - \frac{P_{стном} + \beta^2 P_{Еном}}{\beta P_{2ном} + P_{стном} + \beta^2 P_{Еном}}.$$

Доцільно, як і раніше, основні аналізи провести при чисто активному характері навантаження; тоді

$$S_{2ном} = P_{2ном},$$

$$\beta_i = \beta_p$$

Відповідно однаковою загальною стає і залежність ККД від рівнів навантаження

$$\eta = 1 - \frac{P_{стном} + \beta^2 P_{Еном}}{\beta P_{2ном} + P_{стном} + \beta^2 P_{Еном}}.$$

$$\eta = 1 - \frac{a + \beta^2 b}{\beta P_{2ном} + a + \beta^2 b}.$$

. графічна залежність $\eta = f(\beta)$ показана на рисунку 2.6. Вона має екстремум $\eta_m < 1$, який настає при певному значенні $\beta = \beta_m$.

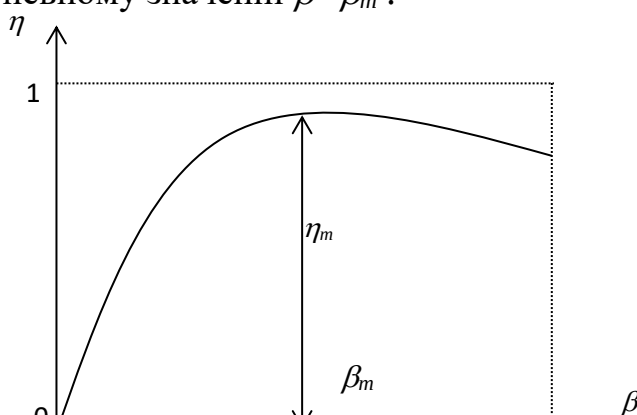


Рисунок 2.6 – Залежність $\eta=f(\beta)$ трансформатора.

За розглядуваних умов при $U_{2ном}=\text{const}$ значення β_m настає при рівності сталих та змінних втрат активної потужності, тобто

$$a = p_{стном} = \beta_m^2 p_{Еном} = \beta_m^2 b.$$

Знайдемо критеріальні значення β_m та η_m для екстремального значення ККД. Для визначення β_m необхідно взяти першу похідну від залежності по змінній β та прирівняти її до нуля

$$\frac{d\eta}{d\beta} = 0$$

Після проведення необхідних операцій та впорядкування

$$\beta_m^2 b = a$$

$$\beta_m^2 = \frac{a}{b}$$

$$\beta_m = \sqrt{\frac{a}{b}};$$

знак “мінус” не має сенсу. Звичайно на визначенні β_m загальні аналізи закінчуються, а далі використовують конкретні розрахункові методи. Але в даному випадку важливо знати й величину η_m , оскільки він є граничним критерієм можливого зменшення втрат активної потужності. Для цього необхідно підставити β_m в формулу загальної залежності.

Після впорядкування

$$\eta_m = 1 - \frac{2\sqrt{ab}}{P_{2ном} + 2\sqrt{ab}}$$

З виразу видно, що в конкретному трансформаторі з певним $S_{2ном}$, втратами $a=p_{стном}$ та $b=p_{Еном}$ при $U_{1ном}=\text{const}$ значенні η_m є сталим. В якомусь іншому трансформаторі такої ж потужності $S_{2ном}$ можлива зміна β_m та η_m за рахунок зміни величин втрат активної потужності, тобто їх перерозподілу.

Цими обставинами скористались при проєктуванні та виготовленні виробничих масляних трансформаторів загального призначення. Найвигідніше експлуатувати трансформатори при $\beta = \beta_m$ та в зонах близьких до цього рівня навантаження. Виробничі трансформатори загального призначення використовуються в умовах широкої зони навантаження при $\beta = 0,4 \dots 0,7$. В зв'язку з цим розподіл втрат a та b вибрано так, щоб β_m наставав в зоні $\beta = 0,45 \dots 0,6$, тобто при найбільш імовірних навантаженнях.

Такі властивості забезпечуються при відносно низьких втратах в сталі a та високих значеннях втрат в обмотках b . Для зниження втрат в сталі використовують якісний вплив за рахунок використання електротехнічних сталей з низькими питомими втратами. Також використовується і кількісний вплив, тобто збільшення площі поперечного перерізу магнітопроводу за рахунок кількісного збільшення витрат електротехнічної сталі та зменшення густини магнітного потоку Φ_0 - індукції B . Водночас кількісно зменшуються витрати обмоткових матеріалів.

Таким чином, перерозподіл втрат активної потужності в трансформаторах дає ряд переваг:

забезпечення відносно високих значень ККД в зоні найбільш імовірних навантажень; відносне збільшення $b = p_{Еном}$ дає суттєву економію обмоткових матеріалів за рахунок збільшення маси дешевшої електротехнічної сталі; при підвищенні навантаження до $\beta > \beta_m$ переважним джерелом втрат та тепловиділення ще в більшій мірі стають обмотки; вони розташовані поверх магнітопроводу і мають кращі умови для відводу тепла за рахунок циркуляції масла.

Величина η_m конкретного трансформатора при чисто активному навантаженні є найбільшою з всіх, реально можливих значень. Тобто η_m при активному навантаженні визначає граничну межу щодо можливого зменшення втрат активної потужності в даному трансформаторі. Тому η_m може слугувати граничним критерієм. При будь-яких інших значеннях β відносні втрати активної потужності будуть більшими, а ККД меншим. Різниця значень ККД

$$\Delta\eta = \eta_m - \eta$$

є ресурсною можливістю, ресурсним потенціалом щодо підвищення ККД та відповідного зменшення втрат.

При розглянутих традиційних формах експлуатації трансформаторів (нерегульованій або з регулюванням $r_n = \text{var}$ при $U_2 = U_{2ном} = \text{const}$) використати згаданий ресурсний потенціал щодо підвищення η неможливо. Проте існують

принципово інші шляхи до зменшення втрат активної потужності. Але при цьому необхідно переходити до багатфакторного регулювання. І при цьому відразу з'ясовувати, чи можливе воно за прийнятих технічних умов або методів живлення решти електротехнічного обладнання.

2.4. Вплив реактивних струмів на властивості трансформаторів.

У технічній літературі питанням впливу реактивних струмів на властивості трансформаторів приділяється досить побіжна увага з огляду на уявну практичну малосуттєвість цих явищ. Практично всі загальновідомі аналізи ККД трансформаторів при впливі реактивних струмів ґрунтуються на базі, рекомендованої державними стандартами. Графічна залежність $\eta=f(\beta)$ при трьох різних фіксованих значеннях $\cos\varphi_2$ показані на рисунку 2.7. Характеристика 1 відповідає чисто активному навантаженню. Зі зменшенням $\cos\varphi_2$ для певних його значень залежності 2 і 3 проходять все нижче. При цьому величини β_m зменшуються, а координата β_{mi} не змінює свого положення. При $U_{2ном}=\text{const}$ рівність втрат активної потужності $p_{cm}=p_E$ настає при однаковому β_i і відповідному струмі незалежно від його характеру.

В діапазоні змін $\cos\varphi_2$ від 1.0 до 0.8 при $\beta_i=1$ відхилення залежностей 2 і 3 від характеристики 1 становлять всього лише одиниці, а для крупних трансформаторів - частки відсотка. Відтак складається враження про малосуттєвість впливів реактивних струмів.

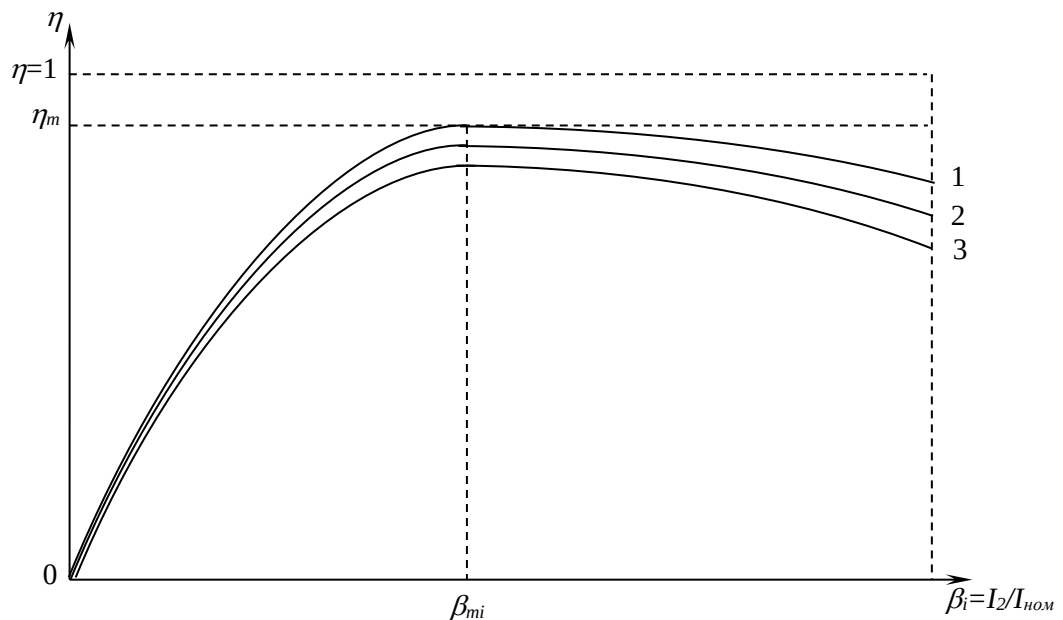


Рисунок 2.7 – Порівняльні залежності $\eta=f(\beta_i)$ трансформатора при різних характерах навантаження

Але при цьому залишаються поза увагою важливі обставини, зокрема:

зі збільшенням реактивної складової струму відповідно зменшується віддавана активна потужність трансформатора;

знижується вихідна база активної потужності трансформатора;

в автономному трансформаторі СПЕ для досягнення необхідного рівня $P_{2\beta}$ при $\cos\varphi_2 < 1$ споживається більший струм, ніж при $\cos\varphi_2 = 1$; при цьому збільшуються втрати активної потужності в обмотках трансформатора;

при використанні сучасних електрофізико хімічних технологій на виробництвах значення $\cos\varphi_2$ можуть знижуватися до 0.7...0.6, інколи й нижче.

З врахуванням таких обставин були проведені спеціальні аналізи, що відповідають не випадковим змінам β_i в трансформаторах загального користування, а цілеспрямованому регулюванню активної потужності з врахуванням зміни $\cos\varphi_2 < 1$. Для цього зміню рівня активного навантаження $P_{2\beta}$ в трансформаторі СПЕ слід розглядати як задану величину. У відповідності до

$$\beta_p = \frac{P_{2\beta}}{P_{2ном}}$$

Необхідна для ТП активна потужність за при змішаному характері навантаження

$$P_{2\beta} = \beta_p P_{2ном} = U_{2ном} I_{2\beta} \cos\varphi_2$$

при сталому $U_{2ном}$ та заданому $\cos\varphi_2$ відповідає змішаному струму

$$I_{2\beta} = I_{2аном} \frac{\beta_p}{\cos\varphi_2},$$

де $I_{2аном}$ -значення номінального струму при чисто активному навантаженні. З виразу (2.30) видно, що цілеспрямоване регулювання на досягнення $P_{2\beta}$ при змішаному характері навантаження змінює струм в $\left(\frac{\beta_p}{\cos\varphi_2}\right)$ разів.

Втрати активної потужності в обмотках

$$p_{E\beta} = I_{2\beta}^2 r_k = I_{2ном}^2 \frac{\beta_p^2}{\cos^2 \varphi_2} r_k = p_{Еном} \left(\frac{\beta_p}{\cos \varphi_2} \right)^2.$$

Сумарні втрати активної потужності

$$\sum p_{\beta} = p_{стном} + p_{Еном} \left(\frac{\beta_p}{\cos \varphi_2} \right)^2.$$

Оскільки надалі аналізуються властивості лише трансформаторів СПЕ, для скорочення записів доцільно позначити

$$\beta_p = \beta ,$$

$$\cos \varphi_2 = k;$$

а позначення втрат активної потужності в номінальному режимі залишити такими, які були прийняті вище, тобто

$$P_{стном} = a,$$

$$P_{Еном} = b.$$

Тоді ККД трансформатора СПЕ з врахуванням впливу реактивних струмів

$$\eta = 1 - \frac{a + \left(\frac{\beta}{k}\right)^2 b}{\beta P_{2ном} + a + \left(\frac{\beta}{k}\right)^2 b}$$

Визначимо критеріальні значення залежності $\eta = f(\beta)$. Для знаходження β_m , при якому настає екстремум η_{mk} , необхідно

$$\frac{d\eta}{d\beta} = 0$$

Після проведення операцій і впорядкування

$$\beta_{mk}^2 = \frac{a}{b} k^2$$

$$\beta_{mk} = k \sqrt{\frac{a}{b}},$$

знак “мінус” не має сенсу. Для знаходження η_{mk} необхідно врахувати ;

після впорядкування

$$\eta_{mk} = 1 - \frac{2\sqrt{ab}}{kP_{2ном} + 2\sqrt{ab}}$$

Для унаочнення результатів аналізу на малюнку 2.8 показана верхня частина порівняльних характеристик ККД, розрахованих для виробничого масляного трансформатора з $S_{2ном} = 630 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $a = 1.56 \text{ кВт}$, $b = 7.60 \text{ кВт}$.

Характеристика 1 відповідає чисто активному навантаженню; характеристики 2 і 3 – змішаному навантаженню при $k = 0.7$. З їх порівняння видно, що в зоні $\beta > \beta_m$

ККД трансформатора СПЕ проходить нижче. Різниця в процентних показниках ККД за цими характеристиками дійсно здається малосуттєвою. Та при переході до конкретних показників втрат активної потужності їх вагомість суттєво зростає; про це докладніше йдеться в наступній темі.

Споживання трансформаторами СПЕ реактивних струмів з мережі при $\cos \varphi_2 < 1$ не лише знижує ККД; при цьому:

відповідно збільшуються втрати активної потужності та нагрівання трансформаторів, що веде до прискорення старіння їх ізоляції;

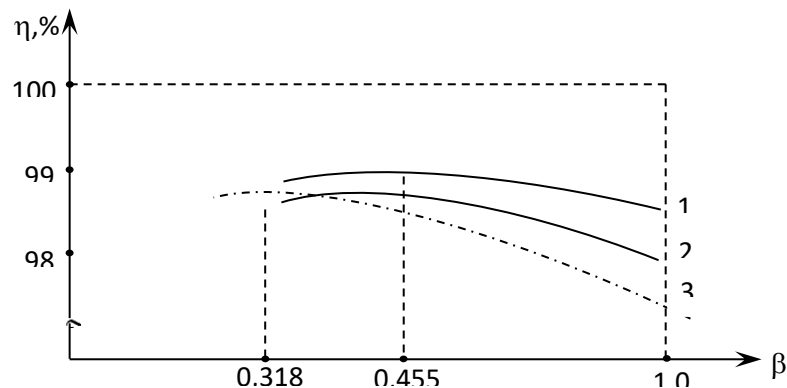


Рисунок 2.8 – Залежності $\eta=f(\beta_i)$ та $\eta=f(\beta_p)$ трансформатора при різних характерах навантаження

подібні ж процеси відбуваються і в мережах електроживлення;

збільшуються витрати за оплату спожитої електроенергії, як активної, так і реактивної;

збільшені струми викликають додаткові спади напруги в трансформаторі і лініях електроживлення; цим знижується напруга безпосередньо в ТП; для досягнення встановленого рівня $P_{2\beta}$ знадобиться додаткове підвищення струму регулюванням $r_n = \text{var}$, що призведе до додаткові негативні прояви.

Все це свідчить, що в сучасних умовах одним з найголовніших енергозбережних заходів при експлуатації виробничих електромеханічних електрофізико хімічних комплексів є місцева компенсація споживаної реактивної потужності.

2.5 Ефективність компенсації реактивної потужності в трансформаторах.

В сучасних умовах виробництва цікавить не стільки те, як знизиться ККД, а наскільки зростуть втрати електричної потужності; особливо, відповідні втрати коштів на їх оплату, та як їх можна зменшити. В даному випадку доцільно проаналізувати ефективність компенсації реактивної енергії, споживаної трансформаторами СПЕ в електрофізикохімічних технологіях.

Для цього доцільно використати конкретний приклад. Візьмемо той же трансформатор, що і в попередньому прикладі, для використання в автономному режимі СПЕ разом з електрофізикохімічним ТП відповідної потужності. Потужність трансформатора в номінальному режимі $S_{2ном}=630\text{кВА}$, $a=1.56\text{ кВт}$, $b=7.60\text{ кВт}$. Змоделюємо три варіанти навантаження: 1) $k=1.0$; 2) $k=0.9$; 3) $k=0.7$. Регулювання струму за допомогою $r_H=\text{var}$.

Визначаємо критеріальні показники значень β_m :

$$\beta_m = \sqrt{\frac{a}{b}} = 0.455;$$

$$\beta_{mk1} = k1 \sqrt{\frac{a}{b}} = 0.41;$$

$$\beta_{mk2} = k2 \sqrt{\frac{a}{b}} = 0.32.$$

Визначаємо η_m :

$$4) \eta_m=98,90\%; 2) \eta_{mk1}=98,62\%; 3) \eta_{mk2}=98,46\%.$$

Визначаємо втрати активної потужності в номінальному режимі:

$$5) \Sigma p=9,16\text{кВт}; 2) \Sigma p_{k1}=11,1\text{ кВт}; 3) \Sigma p_{k2}=17,0\text{ кВт}.$$

Визначаємо ККД в номінальному режимі:

$$6) \eta_{ном}=98.58\%; 2) \eta_{ном\ k1}=98.27\%; 3) \eta_{ном\ k2}=97.37\% .$$

В номінальних режимах втрати збільшуються від 9.16 кВт при $k=1$ до 17.0 кВт при $k=0.7$, тобто майже на 8 кВт. Така різниця заслуговує на більш детальну увагу. Для цього були проведені розрахунки втрат активної потужності відповідно до трьох характерів та різних рівнів навантажень β . Результати приведені на рисунку 2.9 у вигляді відносних залежностей 1, 2 і 3:

$$\frac{\Sigma p}{\Sigma p_{ном}} = f(\beta) \text{ при } k=1;$$

$$\frac{\Sigma p}{\Sigma p_{ном}} = f(\beta) \text{ при } k1=0,9;$$

$$\frac{\Sigma p}{\Sigma p_{ном}} = f(\beta) \text{ при } k2=0,7.$$

Аналізи показали, що для трансформаторів типу ТМ ці залежності є загальними, універсальними. В залежностях за базову величину прийняті втрати активної потужності в трансформаторі в номінальному режимі при чисто активному навантаженні.

На тому ж рисунку 2.9 приведені залежності 4 і 5:

$$\frac{\Delta \Sigma p}{\Sigma p_{ном}} = f(\beta) \text{ при } k_1=0,9;$$

$$\frac{\Delta \Sigma p}{\Sigma p_{ном}} = f(\beta) \text{ при } k_2=0,7.$$

Вони показують різницю, тобто відносне збільшення втрат, при переході від чисто активного характеру навантаження до певного змішаного. Ця різниця є потенційним ресурсом. Якщо на вторинному боці трансформатора була б регульована відповідним чином ємність, яка підвищувала $\cos \varphi_2$ до $k=1.0$, то за рахунок такої компенсації можна було б отримати суттєву економію електроенергії

Розрахуємо таку потенційно можливу економію за допомогою компенсації споживання реактивної енергії, тобто ефективність компенсації реактивної потужності в трансформаторі. Для прикладу припустимо, що за 8-годинну робочу зміну трансформатор працював при $k=0,7$ в середньому в таких режимах:

1) 2 год. при $\beta=0,9$;

2) 2 год. при $\beta=0,7$;

3) 2 год. при $\beta=0,5$;

2 год. при $\beta=0,2$,

тобто при середньому навантаженні за робочу зміну $\beta_{ср}=0,52$.

За характеристикою $\frac{\Delta \Sigma p}{\Sigma p_{ном}} = f(\beta)$ при $k_2=0.7$ знаходимо відповідні відносні значення. Величини $\frac{\Delta \Sigma p}{\Sigma p_{ном}}$ в обраних режимах становлять:

1) $0,68 \Sigma p_{ном}=6,25$ кВт;

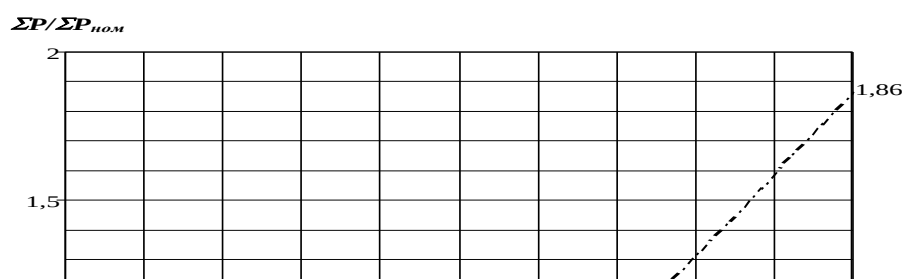


Рисунок 2.9 – Залежності відносних втрат активної потужності $\frac{\Sigma p}{\Sigma p_{ном}} = f(\beta)$

та $\frac{\Delta \Sigma p}{\Sigma p_{ном}} = f(\beta)$ при різних значеннях $\kappa = \cos \varphi_2$ в трансформаторах типу ТМ

2) $0,42 \Sigma p_{ном} = 3,95$ кВт;

3) $0,24 \Sigma p_{ном} = 2,25$ кВт;

4) $0,03 \Sigma p_{ном} = 0,25$ кВт.

Кожен навантажувальний період тривав по дві години; за відповідні періоди була додатково перевитрачена електрична енергія

1) $6,25 \text{ кВт} \cdot 2 \text{ год} = 12,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$;

2) $3,95 \text{ кВт} \cdot 2 \text{ год} = 7,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}$;

3) $2,25 \text{ кВт} \cdot 2 \text{ год} = 4,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$;

4) $0,25 \text{ кВт} \cdot 2 \text{ год} = 0,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Всього за зміну перевитрачено $25,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. При ціні електроенергії $0,25$ грн за $1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ перевитрати становлять: $25,4 \cdot 0,25 = 6,35$ грн за одну робочу зміну.

А якщо встановити додатково ще одну нерегульовану ємність на первинному боці трансформатора, то можна компенсувати й ту реактивну потужність, яку споживає сам трансформатор. За табл.2.1 струм I_0 такого трансформатора становить близько $2\% I_{ном}$; тобто трансформатор споживає реактивну потужність

$$630 \cdot 0,02 = 12,6 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$$

на протязі 8 годин

$$12,6 \text{ кВ} \cdot \text{Ар} \cdot 8 \text{ год} \approx 100 \text{ кВ} \cdot \text{Ар} \cdot \text{год}.$$

При ціні 0,01 грн за 1кВ·Ар·год це могло б дати додаткової економії ще 1 грн за одну робочу зміну.

Таким чином за рахунок вторинної та первинної компенсації споживаної реактивної потужності лише в одному трансформаторі можна зекономити за одну робочу зміну $6,35+1=7,35$ грн.

За 300 робочих днів на рік це може дати економію при:

- однозмінній роботі - $7,35 \cdot 300 \approx 2200$ грн;
- двозмінній - $2200 \cdot 2 = 4400$ грн;
- тризмінній - $2200 \cdot 3 = 6600$ грн.

При цьому ще ніяк не враховані позитивні зміни щодо зменшення нагрівання, втрат активної потужності в лініях електроживлення, стабілізації напруги, покращення загального cosφ виробництва та ін

Проведений аналіз і розрахунки конкретно показують, що компенсація, яка традиційно розглядається першочергово, як засіб покращення загального cosφ та розвантаження ліній електропередачі від реактивних струмів, створює також реальні передумови для зниження споживання активної потужності. Це забезпечує відповідну економію коштів виробництва за оплату спожитої активної і реактивної електроенергії.

Використання на виробництвах конденсаторних батарей, а в деяких випадках і перезбуджених синхронних двигунів, для компенсації реактивної потужності безпосередньо на місцях її споживання високоефективним заходом для виробництв. Найбільш ефективною є компенсація реактивної потужності безпосередньо в зоні живлення електрофізикохімічного ТП, тобто на вторинному боці трансформатора СПЕ. При цьому використання конденсаторних батарей може бути реалізоване у двох варіантах:

поперечна компенсація реактивної потужності, коли X_n ТП та ємність конденсаторної батареї підключаються паралельно;

повздовжня компенсація реактивної потужності, коли конденсаторна батарея підключається послідовно з внутрішнім опором X_n в ТП.

При такому варіанті технологічний пристрій споживає реактивну потужність

$$Q_n = I_{2\beta}^2 \cdot X_n;$$

послідовно включена батарея конденсаторів генерує реактивну потужність

$$Q_c = I_{2\beta}^2 \cdot X_c ;$$

а сумарна реактивна потужність визначається

$$\Delta Q = Q_n - Q_c = I_{2\beta}^2 \cdot (X_n - X_c) ;$$

тобто відбувається саморегуляція реактивної потужності дію навантажувального струму $I_{2\beta}$.

Обидва варіанти знаходять застосування з врахуванням специфіки електрофізико хімічного ТП. Це особливо важливо в потужних електротермічних технологіях, зокрема в електрометалургійних, де потужність спеціальних трансформаторів СПЕ часто становить 5...10 МВ·А, а інколи й до 100 МВ·А. При цьому технологічні процеси можуть відбуватися в різко змінних режимах. Специфіка використання конденсаторних батарей на виробництвах подібного профілю виходить за межі даної дисципліни. Такі проблеми входять до компетенції фахівців з електропостачання та електроспоживання на промислових виробництвах.

2.6. Регулювання первинної напруги трансформаторів

У виробничих трансформаторах СПЕ, які працюють в автономних режимах, принципово можливе регулювання первинної напруги з метою досягнення певних позитивних наслідків. В даному випадку мається на увазі досягнення енергозбережного ефекту. Істотно, що регулювання первинної напруги трансформаторів може бути доцільним при додержанні принаймні двох основних умов:

якщо воно взагалі можливе або не погіршує технологічного процесу;

якщо застосування засобів, необхідних для реалізації такого регулювання, дасть позитивний ефект щодо економії.

Серед різноманітних виробничих ситуацій є й такі, де згадані умови і форми експлуатації є реально здійснюваними.

Тому доцільно провести спеціальний аналіз щодо властивостей автономного трансформатора СПЕ при регулюванні його первинної напруги. Умови попереднього аналізу в цілому такі ж, які обиралися раніше: чисто активне навантаження з регулюванням $r_n = \text{var}$ за моделями мал.2.8, але з додатковим регулюванням напруги $U_1 = \text{var}$.

Головною вихідною умовою такого двофакторного регулювання є збереження заданого рівня споживання активної потужності $P_{2\beta}$, тобто

$$P_{2\beta} = \text{const}.$$

При чисто активному струмі, вже зниженого до необхідного рівня дією $r_H = \text{var}$

$$I_{2\beta} = \beta \cdot I_{2\text{ном}}$$

за допомогою $r_H = \text{var}$ та незмінній напрузі $U_1 \approx U_2 = \text{const}$

$$P_{2\beta} = \beta \cdot P_{2\text{ном}} = U_{2\text{ном}} \cdot (\beta \cdot I_{2\text{ном}}),$$

Але тепер U_2 зменшується пропорційно фактору регулювання $\alpha = \text{var}$, тобто

$$U_{2\alpha} = \alpha \cdot U_{2\text{ном}},$$

де $\alpha < 1$. Відповідно зменшується і вторинний струм

$$I_{2\beta} = \alpha \cdot \beta \cdot I_{2\text{ном}}.$$

Вторинна активна потужність

$$P'_{2\beta} = (\alpha \cdot U_{2\text{ном}}) \cdot (\alpha \cdot \beta \cdot I_{2\text{ном}}),$$

вона знизилася у порівнянні з необхідною. Для того, щоб утримати її на заданому рівні, необхідне додаткове регулювання $r_H = \text{var}$ до потрібного збільшення величини струму за рахунок фактора γ .

Тоді

$$P_{2\beta} = \beta P_{2\text{ном}} = (\alpha U_{2\text{ном}}) \cdot \left(\frac{\alpha \beta}{\gamma} I_{2\text{ном}} \right)$$

З умови незмінності $P_{2\beta}$

$$\gamma = \frac{(\alpha U_{2\text{ном}}) \cdot (\alpha \beta I_{2\text{ном}})}{\beta P_{2\text{ном}}}$$

та з врахуванням того, що $P_{2\text{ном}} = U_{2\text{ном}} \cdot I_{2\text{ном}}$:

$$\gamma = \alpha^2$$

Тоді

$$P_{2\beta} = (\alpha U_{2\text{ном}}) \cdot \left(\frac{\alpha \beta}{\alpha^2} I_{2\text{ном}} \right) = (\alpha U_{2\text{ном}}) \cdot \left(\frac{\beta}{\alpha} I_{2\text{ном}} \right) = \text{const}$$

Це означає, що при подвійному регулюванні електромеханічного комплексу за умови збереження $P_{2\beta} = \text{const}$ при зміні напруги пропорційно α , струм мусить змінюватись регулюванням γ пропорційно β/α відповідно. Тобто,

при певному заданому $P_{2\beta} = \beta \cdot P_{2ном}$ довільні зміни α вимагають і відповідних змін струму пропорційно β/α ; такі умови забезпечують $P_{2\beta\alpha} = \text{const}$.

Таким чином, при запропонованій новій формі експлуатації з регулюванням як живильної напруги, так і внутрішнього опору r_n технологічного пристрою ТП, втрати активної потужності в енергетичних колах трансформатора СПЕ також визначаються двома змінними факторами.

Втрати в сталі

$$P_{ст\alpha} = \alpha^2 P_{стном},$$

Оскільки вони пропорційні квадрату напруги. Втрати в обмотках

$$P_{Е\beta\alpha} = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \cdot P_{Енно},$$

Оскільки вони пропорційні квадрату струму.

Сума втрат активної потужності

$$\sum P_{\beta\alpha} = P_{ст\alpha} + P_{Е\beta\alpha} = \alpha^2 P_{стном} + \frac{\beta^2}{\alpha^2} P_{Еном}.$$

Позначимо, як і раніше

$$a = P_{стном},$$

$$b = P_{Еном}.$$

Тоді

$$\sum P_{\beta\alpha} = \alpha^2 a + \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2}\right) b,$$

де β є заданою величиною, постійною для даного режиму навантаження.

Спеціально проведений аналіз залежності показав, що при незмінному на певному відрізку часі навантаженні, тобто $P_{2\beta\alpha} = \text{const}$ та $\beta = \text{const}$, але регульованому факторі $\alpha = \text{var}$, змінна величина втрат активної потужності $\sum P_{\beta\alpha}$ має мінімальний екстремум при певному значенні регульовального фактора α_m (рисунку 2.10).

Таким чином, як з'ясувалося в процесі аналізів, існує мінімальне значення сумарних втрат активної потужності в трансформаторі $\sum P_{\beta\alpha min}$, яке настає при певній величині напруги, відповідній α_m .

Нові отримані висновки щодо наявності мінімальних рівнів втрат активної потужності при регулюванні первинної напруги відкривають відповідно нові можливості і перспективи щодо шляхів зменшення втрат в процесі експлуатації електромеханічних пристроїв.

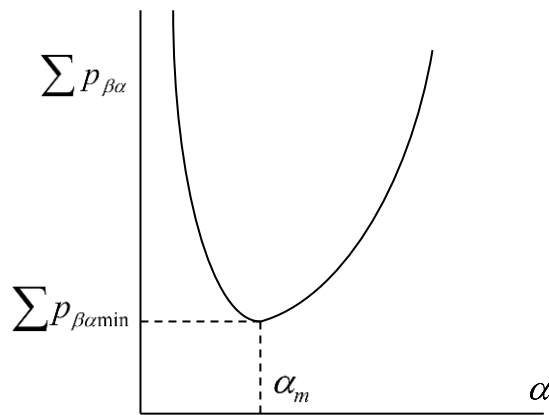


Рисунок 2.10 – Залежність $\Sigma p_{\beta\alpha}=f(\alpha)$

Величину необхідного рівня напруги, відповідного α_m , та значення $\Sigma p_{\beta\alpha min}$ можна знайти за умовами знаходження екстремумів: взяти першу похідну по змінній α і прирівняти її до нуля

$$\frac{d \Sigma p_{\beta\alpha}}{d\alpha} = 0$$

Після впорядкування

$$\alpha_m^4 = \beta^2 \frac{b}{a}$$

$$\alpha_m^2 = \beta \sqrt{\frac{b}{a}}$$

знак "мінус" не має сенсу

$$\alpha_m = \sqrt{\beta \sqrt{\frac{b}{a}}} = \sqrt{\beta} \cdot \sqrt[4]{\frac{b}{a}}$$

При α_m настає мінімально можливий рівень втрат активної потужності $\Sigma p_{\beta \min}$; для його знаходження підставляємо значення α_m в загальну залежність. Після впорядкування

$$\sum p_{\beta \min} = 2\beta\sqrt{a \cdot b}$$

Це означає, що при притаманних даному трансформатору величинах a та b мінімально можливий рівень втрат активної потужності залежить лише від заданого рівня навантаження β . Тобто величина визначає граничну межу, критеріальний ліміт даного трансформатора щодо мінімізації сумарних втрат активної потужності в абсолютному вираженні.

Забезпечення $\Sigma p_{\beta \min} = \Sigma p_{\min}$ означає, що ККД при цьому буде максимальним. Це можна перевірити, підставивши $\Sigma p_{\beta \min}$ в загальну стандартну формулу ККД при чисто активному навантаженні

$$\eta_{m\beta\alpha} = 1 - \frac{2\beta\sqrt{ab}}{\beta P_{2ном} + 2\beta\sqrt{ab}} = 1 - \frac{2\sqrt{ab}}{P_{2ном} + 2\sqrt{ab}} = \eta_m;$$

результат повністю співпадає для визначення η_m .

Звертає на себе увагу найбільш важлива обставина у цьому аналізі. Заданий рівень основного навантаження $\beta \cdot P_{2ном}$ і відповідні мінімальні втрати активної потужності $\Sigma p_{\beta \min}$ залежать від β однаково-прямо пропорційно. Тому у виразі для $\eta_{m\beta\alpha}$ величина β зникає, цей ККД від β не залежить. Такі обставини означають, що при розглянутому двофакторному регулюванні трансформатор СПЕ при будь-якому рівні активного навантаження β може працювати з мінімальними втратами активної потужності, тобто з максимальним ККД η_m незмінної величини.

Таким чином при виборі будь-якого $\beta < 1$ та забезпеченні регулювання

$$U_{1\alpha} = \alpha_m U_{1ном}$$

$\beta = \beta_m$ може зміщуватись по всьому діапазону регулювання β , зберігаючи при цьому $\eta_m = \text{const}$, як показано на рисунку 2.11. Тобто, запропонований метод дозволяє керувати характеристикою ККД, зміщуючи η_m до потрібного рівня β .

В той же час за умови регулювання лише $r_H = \text{var}$ при $\alpha = 1 = \text{const}$ втрати активної потужності при рівні активного навантаження β складають:

$$\sum p_{\beta} = a + \beta^2 b.$$

Вони завжди, крім $\beta = \beta_m$, є вищими, ніж мінімальні втрати $\Sigma p_{\beta \min}$ при значенні регульованої напруги $U_{1\alpha} = \alpha_m U_{1ном}$. Це є потенційний ресурс до подальшого зменшення втрат.

В кінцевому розрахунку для конкретного діючого електромеханічного комплексу цікавлять не абсолютні значення Σp_β та $\Sigma p_{\beta \min}$, а їх різниця $\Delta \Sigma p$. Саме вона визначає ту додаткову економію, яку можна було б отримати на даному трансформаторі при переході від форми експлуатації з одним регульовальним фактором $r_n = var$ до форми експлуатації з двома регульовальними факторами - $r_n = var$ та $U_1 = var$.

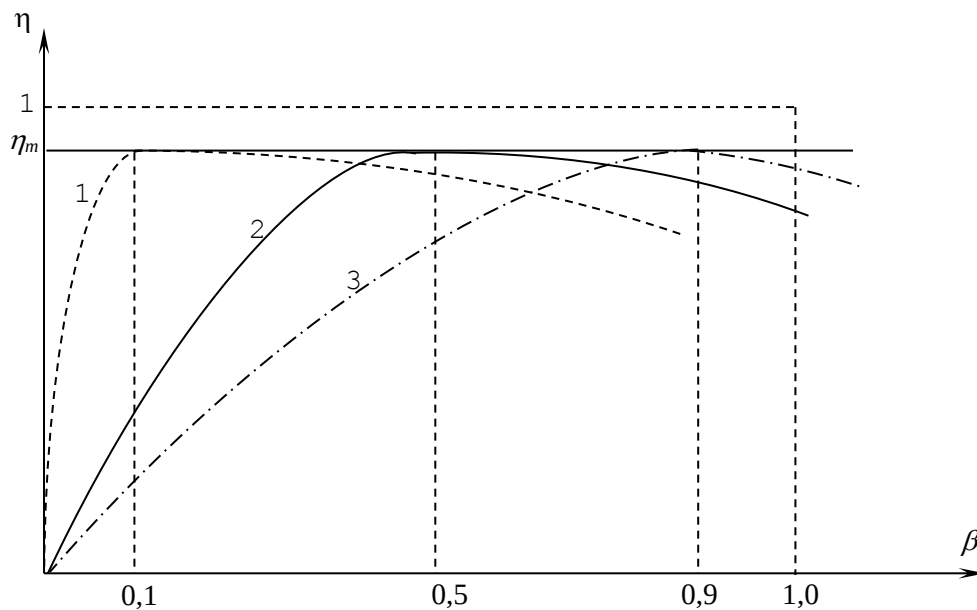


Рисунок 2.11 – Зміна характеристик ККД трансформатора СПЕ при регулюванні

$$U_{1\alpha} = \alpha_m U_{1ном} : 1-\beta=\beta_m=0,1; 2-\beta=\beta_m=0,5; 3-\beta=\beta_m=0,9$$

Визначимо цю різницю

$$\Delta \Sigma p = \Sigma p_\beta - \Sigma p_{\beta \min} = a + \beta^2 b - 2\beta \sqrt{ab} = \sqrt{a} \sqrt{a} - 2\beta \sqrt{a} \sqrt{b} + \beta^2 \sqrt{b} \sqrt{b}$$

Нескладний аналіз показує, що це є квадратний двочлен

$$\Delta \Sigma p = (\beta \sqrt{b} - \sqrt{a})^2$$

або

$$\Delta \Sigma p = (\sqrt{a} - \beta \sqrt{b})^2 ;$$

при зведенні в квадрат результат буде плюсовим незалежно від знаку величини в дужках.

Критерій $\Delta \Sigma p$ можна перетворити у зручніший з врахуванням величини β_m :

$$\beta_m = \sqrt{\frac{a}{b}}$$

Тоді

$$\Delta \Sigma p = (\sqrt{a} - \beta \sqrt{b})^2 = \left[\sqrt{b} \left(\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{b}} - \beta \right) \right]^2 = b \left(\frac{\sqrt{a}}{b} - \beta \right)^2 = b(\beta_m - \beta)^2$$

Одержаний критерій

$$\Delta \Sigma p = b(\beta_m - \beta)^2$$

визначає ту абсолютну величину економії активної потужності за рахунок зменшення втрат, яку можна отримати при переході від традиційної форми експлуатації при $U_1 = U_{I_{ном}} = \text{const}$ до форми з регулюванням напруги $U_{1\alpha} = \alpha_m U_{I_{ном}}$. Ефективність такої форми експлуатації трансформаторів стосовно до конкретних виробничих умов розглядається в наступній темі.

2.7. Оцінки ефективності регулювання виробничих трансформаторів

Наведені вище аналізи і розрахунки режимів роботи автономних трансформаторів СПЕ свідчать, що досягти зменшення втрат потужності в них можна шляхом використання різних методів регулювання. По суті методи регулювання відображають форми експлуатації трансформаторів СПЕ в складі електромеханічних комплексів:

найпростіша форма експлуатації - нерегульований трансформатор;

проста регульована форма – трансформатор з однофакторним регулюванням рівня активного навантаження за допомогою $r_n = \text{var}$;

вища – трансформатор з однофакторним регулюванням рівня активного навантаження за допомогою $r_n = \text{var}$, а також регулюванням місцевої компенсації споживання реактивної потужності;

більш висока – трансформатор з двофакторним регулюванням рівня активного навантаження: $1 - r_n = \text{var}$; 2-первинної напруги $U_{1\alpha} = \text{var}$; а також регулюванням місцевої компенсації споживання реактивної потужності;

ще більш висока форма експлуатації – трансформатор з трифакторним регулюванням рівня активного навантаження: 1 - $r_n = \text{var}$; 2 - $U_{1\alpha} = \text{var}$; 3 - $f_1 = \text{var}$; а також регулюванням місцевої компенсації споживання реактивної потужності; в даній дисципліні не розглядається.

Реальна ефективність застосування вказаних методів є різною. Чим вищою є форма експлуатації, тим більшою може бути економія споживання електроенергії. Але тим складнішими і дорожчими стають системи регулювання; вони вимагають додаткових витрат на модернізацію та експлуатацію таких електромеханічних комплексів.

З врахуванням таких обставин наступні послідовні рівні підвищення ефективності експлуатації трансформаторів СПЕ відповідають послідовності, наведеній вище. Тобто:

найефективніший захід – зменшити рівень споживання активної потужності в технологічному пристрої ТП; це дозволить відповідно зменшити потужність трансформатора СПЕ;

якщо дозволяють технологічні умови – перейти від нерегульованого ТП з $r_n = \text{const}$ (або некерованими змінами r_n) до регульованого $r_n = \text{var}$;

якомога ширше застосовувати регулювання місцевої компенсації споживання реактивної потужності; стосовно трансформаторів СПЕ, як було показано вище, цей метод виявляється високоефективним; він дає змогу суттєво покращити роботу всього енергетичного електромеханічного обладнання та ліній електроживлення і при цьому також заощадити суттєві кошти за оплату спожитої електроенергії.

Застосування більш високих форм експлуатації, зокрема регулювання $U_{1\alpha} = \text{var}$, а тим більше $f_1 = \text{var}$, у кожному конкретному випадку вимагає конкретних аналізів щодо економічної доцільності запровадження таких заходів. Стосовно розглянутого методу регулювання рівня активного навантаження зміною первинної напруги, то він є новим; і до того ж передбачає досить обмежену область застосування в автономних трансформаторах СПЕ для деяких електрофізикохімічних технологій.

До того ж, проведені аналізи, розрахунки та критерій показують, що у застосуванні до трансформаторів з $\beta_m = 0,45 \dots 0,6$ ефективність регулювання $U_{1\alpha} = \text{var}$, є відносно невисокою, особливо при некомпенсованому безпосередньо в ТП споживанні реактивної потужності. Але розрахунки показують також, що при застосуванні регулювання первинної напруги до трансформаторних пристроїв з $\beta_m = 0,7 \dots 0,9$, особливо при скомпенсованому

споживанні реактивної потужності безпосередньо в ТП, економічний ефект може бути суттєвим.

В подальшому, в наступних темах, висока ефективність запропонованого нового методу мінімізації втрат активної потужності регулюванням $U_{Ia}=\text{var}$ підтверджується його застосуванням до асинхронних двигунів.

Що стосується трансформаторів загального користування ДЕЕ, то в них згадані методи регулювання для зменшення втрат активної потужності не можуть бути застосованими. В таких трансформаторах вихідна напруга і частота мусять бути стабільними. В них рівень активного навантаження не регулюється, а визначається сумарною потужністю споживачів, які живляться від нього в даний момент. Але і щодо трансформаторів загального користування при зниженні загального навантаження є певні регулювальні методи отримання економії електроенергії.

Існуючі рекомендації передбачають при суттєвому зниженні навантаження регулювання шляхом перевodu навантаження з одного мало навантаженого трансформатора до другого, включеного паралельно з ним. Перший трансформатор при цьому відключається від живлення. Передбачається, що за таких умов відбувається економія за рахунок вилучення споживання реактивної потужності у першому трансформаторі.

Але одночасно зростає активне навантаження другого трансформатора, а відтак і збільшення витрат активної потужності в ньому. Розглянемо це на конкретному прикладі. Два паралельно включених трансформатори по 630 кВ·А мають рівні навантаження по $\beta=0,25$ при $k=\cos\varphi_2=1$. Втрати активної потужності в кожному з них:

$$\sum p_{12}=a+\beta^2 \cdot b=1,56+0,06 \cdot 7,6=2,04 \text{ кВт};$$

разом в двох трансформаторах $2,04 \cdot 2=4,08 \text{ кВт}$.

При відключенні першого трансформатора на другому виникає $\beta=0,5$. Тоді втрати в другому трансформаторі

$$\sum p_2=1,56+0,25 \cdot 7,6=7,6 \text{ кВт}.$$

Зменшення втрат активної потужності становить

$$4,08 \text{ кВт}-3,46 \text{ кВт} \approx 0,5 \text{ кВт}.$$

За 8 – годинну робочу зміну споживання активної електроенергії зменшується на

$$0,5 \text{ кВт} \cdot 8 \text{ год} = 4 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

При ціні активної електроенергії 0,25грн. за 1кВт.год економія за її споживання становить

$$4\text{кВт}\cdot\text{год}\cdot 0,25\text{грн.}/\text{кВт}\cdot\text{год}=1\text{грн.}$$

Споживання реактивної потужності трансформатором становить близько $0,02S_{2\text{ном}}$, тобто 12,6 кВт·Ар. За 8 – годинну робочу зміну споживається $12,6\cdot 8\approx 100\text{кВт}\cdot\text{Ар}\cdot\text{год}$.

При ціні реактивної електроенергії 0,01 грн за 1кВт·А·год економія з одного трансформатора становить 1грн. Сумарна економія за зміну 2 грн.

Тепер розглянемо таку ж ситуацію при тому ж рівні споживання активної потужності, але при $k = 0,7$. Втрати активної потужності, в кожному трансформаторі

$$\sum p_{12} = a + (\beta/k)^2 \cdot b = 1,56 + (0,0625/0,49 \cdot 7,6 = 2,53 \text{ кВт};$$

разом в двох трансформаторах $2,53 \cdot 2 = 5,06\text{кВт}$.

При відключенні першого трансформатора на другому виникає $\beta=0,5$. Втрати в ньому становлять

$$\sum p_2 = 1,56 + 0,25/0,49 = 5,46 \text{ кВт.}$$

В цьому варіанті відбулось збільшення витрат активної потужності на

$$5,46\text{кВт} - 5,06 \text{ кВт} \approx 0,5\text{кВт}.$$

За 8 – годинну робочу зміну збитки за споживання активної електроенергії становлять 1грн. За той же час за рахунок відключення одного трансформатора зекономлена 1грн. В результаті регулювальної операції з відключенням одного трансформатора економічний ефект є нульовим.

При зростанні рівнів навантаження до $\beta=0,3$ і вище будуть все зростаючі збитки, особливо при низьких значеннях k . Таким чином, рекомендація щодо переведу навантажень на один трансформатор має досить неоднозначний характер. Розроблені методи аналізу дозволяють визначити, коли така операція є вигідною, а коли збитковою. При рівнях сумарного навантаження в одному трансформаторі $\beta > \beta_m$ такий перевед є завжди збитковим, навіть при $k=1$. При рівнях сумарного навантаження $\beta < \beta_m$ перевед навантаження на один трансформатор є вигідним при досить високих значеннях k .

Найбільш простим і ефективним регулювальним заходом по енергозбереженню в трансформаторах загального користування ДЕЕ є місцева компенсація споживання реактивної потужності за усередненими показниками

k. Навіть неповна компенсація реактивної потужності, особливо при низьких *k*, дозволяє суттєво покращити енергетичні показники та умови експлуатації електрообладнання. При цьому зменшується споживання реактивної і активної електроенергії та кошти на її оплату. Ще більш високоефективною є регульована місцева компенсація споживання реактивної потужності в спеціалізованих автономних трансформаторах для електрофізико хімічних технологій. Роль таких технологій на виробництві постійно зростає.

3. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

3.1 Особливості експлуатації асинхронних двигунів

Практичне використання ресурсоенергозбережних властивостей асинхронних двигунів з короткозамкненими роторами суттєво залежить від того, як враховуються їх особливості і специфічні прояви при експлуатації. Тому доцільно узагальнити і коротко нагадати найбільш важливі з цих особливостей, які виявляються на різних етапах використання асинхронних двигунів.

Вибір асинхронного двигуна, тобто визначення ресурсозбережної відповідності двигуна даному технологічному механічному пристрою ТП, є однією з таких найважливіших особливостей. Від того, наскільки раціонально вибраний асинхронний двигун до умов експлуатації ТП, дуже суттєво залежать витрати коштів на придбання такого двигуна та супутньої комутаційно-регулювальної апаратури. Реальні ціни на асинхронні двигуни, як і на інше електромеханічне обладнання, за останні роки зросли багатократно. Наприклад, середні ціни на асинхронні двигуни з короткозамкненими роторами загального призначення зараз становлять:

- потужністю 11...15 кВт – 1000...1200 грн;
- потужністю 45...55 кВт – 2500...4500 грн;
- потужністю 110...132 кВт – 6000...7000 грн.

Традиційні рекомендації по використанню та експлуатації асинхронних двигунів створювалися в часи значно нижчих цін і відповідного ставлення до такого обладнання, особливо малопотужного, як до відносно малоцінного. Це відповідним чином відображалось і в рекомендаціях. Тому в сучасних умовах вибір асинхронного двигуна до конкретного механічного ТП мусить провадитись більш обґрунтовано і ретельно; не приблизно, а на основі розрахунків можливих режимів роботи і рівнів навантажень з врахуванням впливів інших факторів.

Основними межами (лімітерами) при виборі двигуна є такі:

Створення безумовної надійності технологічного процесу, що забезпечується вибраним двигуном;

Граничне зменшення потужності двигуна з залишенням певних мінімальних резервів щодо потужності та обертового моменту на випадок

можливого погіршення якості електричної енергії, зокрема величини напруги, непередбачених навантажень і таке інше.

Істотно, що при цьому необхідно врахувати не лише вартість двигуна та іншого відповідного обладнання, але й його енергозбережні можливості при експлуатації. Для розрахунків при виборі двигуна існують методичні розробки для визначення його оптимальних технічних характеристик для кожного з стандартних режимів $S1 \dots S8$ та різних типових навантажувальних діаграм.

Але якщо навіть асинхронний двигун до даного ТП був обраний достатньо оптимально і вдало, то за певний час умови використання ТП могли змінитися. Наприклад, завдяки вдосконаленню технології виробництва або заміни виробів потреба ТП щодо потужності електроприводного двигуна зменшилася. В таких випадках є бажаним проаналізувати стан експлуатації і на основі розрахунків визначитись з доцільністю вибору нового двигуна. Демонтований двигун можна використати для інших потреб, яким він відповідає краще.

Усталені (тривалі) та змінні режими $S1 \dots S8$ при $U_1 = U_{1\text{ном}} = \text{const}$, тобто при нерегульованій експлуатації асинхронних двигунів, визначаються лише необхідними змінами навантажень з боку ТП. Більшість сучасних асинхронних двигунів запроектована так, що максимальне значення ККД настає в зоні навантажень $(0.65 \dots 0.9)P_{2\text{ном}}$. Це і є оптимальна зона їх навантажень. Якщо ж експлуатаційний режим відбувається при суттєво нижчому рівні навантаження, до того ж на протязі тривалого часу, що це є безсумнівною ознакою неекономічної експлуатації.

Практика експлуатації асинхронних двигунів показує, що при зниженні середнього рівня навантаження до $(0.5 \dots 0.45)P_{2\text{ном}}$ або нижче доцільно ретельніше переглянути умови їх експлуатації. Слід узгоджено з спеціалістами-технологами вирішувати питання про доцільність подальшої експлуатації даного недовантаженого технологічного пристрою ТП або встановленого двигуна; про розділення технологічного процесу на різні ТП та відповідні їм двигуни і т. ін. Істотно, що така модернізація мусить ґрунтуватись на економічних розрахунках.

Інтенсифікація технологічних процесів в багатьох випадках значно підвищує динаміку змін режимів експлуатації. Все більша частина асинхронних двигунів діє не в усталеному (тривалому) режимі $S1$, а в короткочасних, повторно-короткочасних, переміжних та інших режимах. За таких обставин в сучасних умовах все відчутнішими стають недоліки і втрати, пов'язані з нерегульованою формою експлуатації асинхронних двигунів з короткозамкненими роторами.

Регулювальні режими роботи в асинхронних двигунах з короткозамкненими роторами здійснити досить складно. Вони в основному зводяться до використання трьох можливостей:

переключення схем з'єднання обмотки статора для ступінчатої зміни полюсності, а відповідно і синхронної швидкості обертання первинного магнітного поля; такий метод використовується в багато швидкісних асинхронних двигунах;

регулювання величини живленої напруги $U_1 = \text{var}$;

регулювання частоти $f_1 = \text{var}$.

Ступінчате переключення обмоток в багато швидкісних асинхронних двигунах використовується все ширше. Але воно не вирішує більшості проблем регульованої експлуатації. Особливо при переключенні обмоток під струмовим навантаженням, тим більше при високій динаміці таких змін. Регулювання частоти $f_1 = \text{var}$ пов'язане з серйозними технічними ускладненнями і відповідними капіталовкладеннями. Досить перспективними видається ширше використання регулювання $U_1 = \text{var}$ для зменшення втрат електричної енергії.

При зменшенні навантаження асинхронного двигуна зниження напруги дозволяє отримати суттєве зниження споживання активної потужності. Одночасно з цим зменшується і споживання реактивної потужності, викликане переважно наявністю повітряного зазору між статором і ротором двигуна. При цьому мета і відповідні критерії (закони) регулювання можуть бути різними. Але при зменшенні напруги завжди необхідно мати на увазі необхідність забезпечення стійкості роботи асинхронного двигуна. Для цього принаймні необхідно дотримуватися умови

$$\frac{M_{\max}}{M} > 1$$

Основні проблеми при цьому виникають у створенні $U_1 = \text{var}$. Для цього є по суті два методи:

регулювання при незмінній нарузці $U_1 = \text{const}$ за допомогою переключення схем обмотки статора, апаратів регулювання, параметричних регуляторів та інше;

створення проміжних джерел регульованої електроенергії.

Поки що реально більш доступними є варіанти першого методу. Один з найпростіших варіантів передбачає переключення обмотки статора з схеми трикутника на схему зірки. Але це одноступінчате грубе регулювання.

В сучасних умовах досить ефективним засобом регулювання напруги є трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням РПН. В зв'язку з цим за останній час попит на регульовальні трансформаторні системи постійно зростає. Розширення використання трансформаторів з РПН визнане одним з пріоритетних напрямків дальшого поширення енергозбережних методів експлуатації обладнання на виробництвах.

Інколи з цією метою використовують й інші регульовальні засоби. Зокрема, індукційні регулятори, тобто асинхронні фазні двигуни з загальмованим ротором, який можна повертати на певний кут і тим змінювати вихідну напругу. Переважно використовуються пристрої з регулюванням індуктивних опорів, це зменшує втрати активної потужності у порівнянні з резисторним регулюванням – автотрансформатори, індуктивні регульовані дроселі, трансформатори з підмагнічуванням та інше.

І все ж найбільш ефективним сучасним засобом є варіанти другого методу по створенню регульованих джерел напруги, переважно на схемах з керованими елементами – транзисторами, тиристорами та інше. Поки що силові електронні пристрої залишаються ще досить дорогими і недостатньо надійними. Але вони дозволяють проводити регулювання не лише в стаціонарних або досить повільних циклічних режимах експлуатації, як це притаманно механічним системам регулювання, а й у будь-яких високодинамічних. Тому за електронними системами регулювання є явні переваги в майбутньому.

Слід також зазначити, що при створенні таких регульовальних систем (блоків) одночасно може вирішуватись і проблема регулювання частоти $f_1 = \text{var}$. Подібний варіант використання частотнорегульованих асинхронних двигунів мусить також розглядатись з позицій економічної доцільності з врахуванням реальних потреб і можливостей самої механічної технології, тобто умов роботи ТП.

Холостий хід асинхронного двигуна є граничною межею зниження навантаження. Це період, що відповідає ненавантаженому ТП (заміна інструментів, оброблюваних деталей, час навантаження або розвантаження оброблюваного матеріалу, інші неробочі паузи). Реалізація цього режиму може відбуватися при застосуванні різних варіантів:

ТП продовжує рух, як і в робочих режимах, але без навантаження; при цьому асинхронний двигун може живитися від джерела:

1.1) з напругою $U_1 = U_{1\text{ном}} = \text{const}$;

1.2) з напругою $U_1 < U_{1\text{ном}}$.

ТП необхідно зупинити; це можна зробити різними засобами:

2.1) вимкнути асинхронний двигун від джерела живлення $U_1 = \text{const}$; так працюють обмежувачі холостого ходу;

2.2) між ТП та асинхронним двигуном застосувати керовану електромагнітну муфту ковзання, яка роз'єднується на період холостого ходу;

2.3) при цьому на асинхронному двигуні можна знизити напругу $U_1 < U_{\text{ном}}$ до $U_1 = (0,2 \dots 0,3) U_{\text{ном}}$, яка забезпечує рух асинхронного двигуна при одночасному суттєвому зниженні споживаної електроенергії.

Застосування того чи іншого варіанту режиму холостого ходу залежить від конкретних виробничих умов та рівня професійності фахівців, які забезпечують експлуатацію електромеханічного комплексу. Енергозбережні наслідки від застосування різних варіантів також будуть різними.

Перехідні процеси в роботі асинхронного двигуна заслуговують на особливу увагу. Часті вмикання та вимкання асинхронних двигунів, особливо підвищеної потужності, призводять до ряду негативних наслідків:

при вмиканні двигуна під напругу $U_{\text{ном}} = \text{const}$ виникають пускові струми, що становлять $(5 \dots 7) I_{\text{ном}}$;

викликані ними електромагнітні сили, пропорційні квадрату струму, у 25...50 разів перевищують дію цих сил в номінальному режимі; вони прискорено руйнують обмотки, особливо їх ізоляцію і механічну систему двигуна;

у такій же кратності збільшуються втрати активної потужності за періоди пускових режимів;

ці втрати термічно перевантажують обмотки двигуна, прискорюють процес старіння ізоляції;

пускові струми діють і в трансформаторному джерелі живлення, викликаючи подібні ж негативні наслідки;

короточасні перевантаження живильного трансформатора загального користування пусковими струмами знижують його вихідну напругу і тим погіршують роботу інших споживачів електричної енергії, що живляться від нього.

У деяких випадках трансформатор взагалі не може забезпечити надійне електропостачання інших споживачів і мусить бути переведений в автономний режим лише для обслуговування даного асинхронного двигуна. Але при цьому трансформатор має бути в декілька разів потужнішим від двигуна, щоб

забезпечити його пускові режими. В той же час при усталеному режимі роботи, тим більше недовантаженому асинхронному двигуні трансформатор функціонує при занадто заниженому неекономічному рівні навантаження.

При вимиканні асинхронних двигунів електромагнітні руйнівні сили менш вразливі. Але натомість при розмиканні механічних контактів комутатора КЕЕ, через які нерідко протікають досить значні струми, виникають імпульсні прояви комутаційних ЕРС, які руйнують ізоляцію обмоток двигуна і живильного трансформатора. Від дії електричної дуги між контактами комутаційного пристрою вони швидко виходять з ладу. Розрахувати в економічних показниках заподіювану шкоду досить складно. Та з практики експлуатації електромеханічних комплексів добре відомо, що недосить професійна експлуатація асинхронних двигунів різко зменшує терміни їх використання. А ремонтні роботи по відновленню обмотки статора не набагато нижчі від ціни двигуна.

До цього слід додати ще одну групу перехідних процесів, яка чим далі більше виникає в умовах експлуатації асинхронних двигунів. Мається на увазі високий динамізм сучасних технологій, при якому стає неекономічним очікувати самодовільної зупинки ТП разом з двигуном, тобто вільного вибігу, який може тривати досить довго. Для прискорення цих процесів також використовуються регульовальні системи електромагнітного гальмування, переважно динамічного, або противмиканням (режим електромагнітного гальма). Обидва методи мають суттєві вади щодо втрат активної потужності, але нерідко їх використання все ж запобігає ще більшим втратам. З метою енергозбереження все частіше намагаються використати варіанти динамічного гальмування з рекуперацією електричної енергії.

Аналіз вказаних та інших обставин щодо виникнення і дії перехідних процесів при пуску і відключенні асинхронних двигунів при $U_1 = \text{const}$ показує, що така форма їх експлуатації викликає суттєві проблеми щодо її неекономічності в сучасних умовах. В той же час використання регульованих джерел живлення в основному знімає згадані проблеми, забезпечує ресурсозбережну та енергоекономічну експлуатацію.

Так, пуск асинхронного двигуна при відповідно зниженому $U_{1\alpha}$ забезпечує практично безпоштовховий його перехід від нерухомого стану до обертання. При цьому потужність трансформатора і асинхронного двигуна можуть бути практично однаковими для автономного режиму. А при використанні трансформатора загального користування пускові режими не впливають на роботу інших споживачів. Розрив електричного кола комутаторним пристроєм при зниженій напрузі і майже знеструмленому

двигуні також не викликає істотних проблем. Відповідно вирішуються і гальмові процеси для зупинки двигуна. На додаток до цього відбувається суттєве скорочення витрат активної потужності.

При глибокому регулюванні до $U_{1\alpha}=0$ в ряді випадків взагалі відпадає потреба у використанні механічних або електромеханічних апаратів КЕЕ для замикання або розмикання електричного кола. Таким чином можна об'єднати в одному регульовальному напівпровідниковому електронно-керованому пристрої всі уособлені регульовальні функції:

комутацію електричних кіл;

регулювання напруги;

перетворення частоти $f_1=\text{var}$ споживаної двигуном електричної енергії.

Пристрої такого типу носять різні назви – м'які комутатори, електронні комутатори, перетворювачі частоти і напруги і т. I_n . Їх застосування є самою прогресивною формою регулювання асинхронних двигунів. В різних варіаціях вони застосовуються все інтенсивніше, особливо для двигунів відносно невеликої потужності. В багатьох конкретних застосуваннях їх переваги стають все більш ефективними. В певних конкретних напрямках такі системи в недалекому майбутньому мають замінити менш економічні існуючі форми експлуатації при $U_1=\text{const}$ або з регулюванням механічними контактними системами.

3.2 Умови створення аналітичних моделей асинхронних двигунів

Основою подальших аналізів щодо зменшення втрат активної потужності в асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором можуть слугувати методи, розроблені вище для аналізів трансформаторів. Асинхронний двигун близький до трансформатора за внутрішніми взаємозв'язками. Принциповою його відмінністю є наявність вихідного кола механічної енергії та відповідних йому втрат механічної потужності $p_{\text{мех}}$. Решта відмінностей носить в основному кількісний характер: відносно більші сумарні втрати активної потужності та відповідно нижчий ККД; інший розподіл втрат в сталі $p_{\text{ст}}$ та в обмотках p_E ; суттєво вищий струм намагнічування I_0 з-за впливу повітряного зазору між статором і ротором та ін.

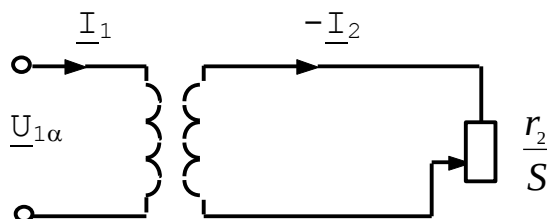
Для аналізів енергозбережних можливостей асинхронних двигунів потрібно створити відповідні аналітичні моделі, подібно тому, як це було проведено вище стосовно трансформаторів. За вихідну модель обрана однофазна фізична схема асинхронного двигуна та відповідна їй T -подібна схема заміщення (рисунок 3.1, а, б) з паралельним з'єднанням активного r_0 та

індуктивного x_0 опорів намагнічуючого контуру. Вона зручніша для аналізів, ніж модель з послідовним з'єднанням параметрів цієї гілки схеми.

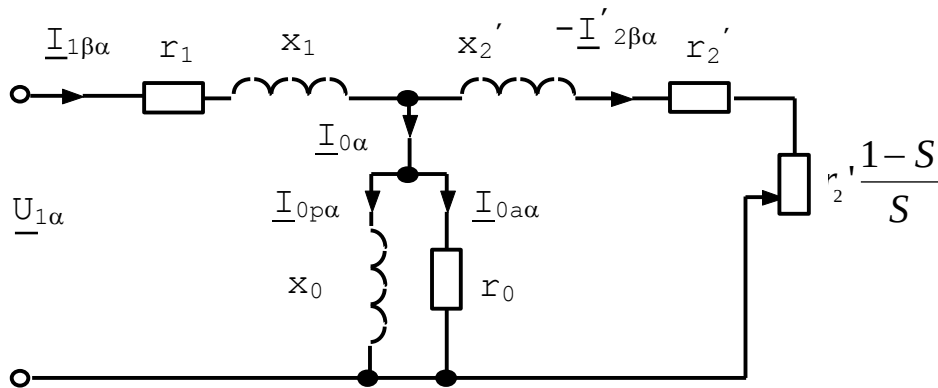
Подальші варіанти моделей спрощуються з метою створення можливості використання їх для практичних розрахунків. Такі перетворення здійснюються шляхом нехтування другорядними величинами, які малосуттєво впливають на кінцеві результати. Зокрема, це індуктивні опори розсіювання x_1 та x_2' (рисунок 3.1, в). Їх відносні величини є помітно більшими, ніж в трансформаторі, але все ж суттєво меншими від індуктивного опору взаємоіндукції x_0 .

Разом з тим, на протилежність трансформаторам, в асинхронних двигунах нехтувати струмом I_0 недоцільно, бо це може внести суттєву похибку. Проте при практично достатній точності розрахунків струмів можна знехтувати активною складовою цього струму $I_{0a\alpha}$, яка є суттєво меншою від реактивної складової $I_{0p\alpha}$ (рисунок 3.1, г).

При визначенні струмів за цією моделлю доцільно виходити з таких міркувань. Основна складова струму $I_{1\beta\alpha}$ є чисто активною. Вона створюється дією потужності $\beta P_{2ном}$, яку споживає пристрій ТП. Ця активна складова відповідає величині зведеного струму вторинної сторони $I'_{2\beta\alpha}$. Індекс β свідчить про залежність величини від рівня активного навантаження; індекс α — про залежність величини від рівня регульованої напруги.



а)



б)

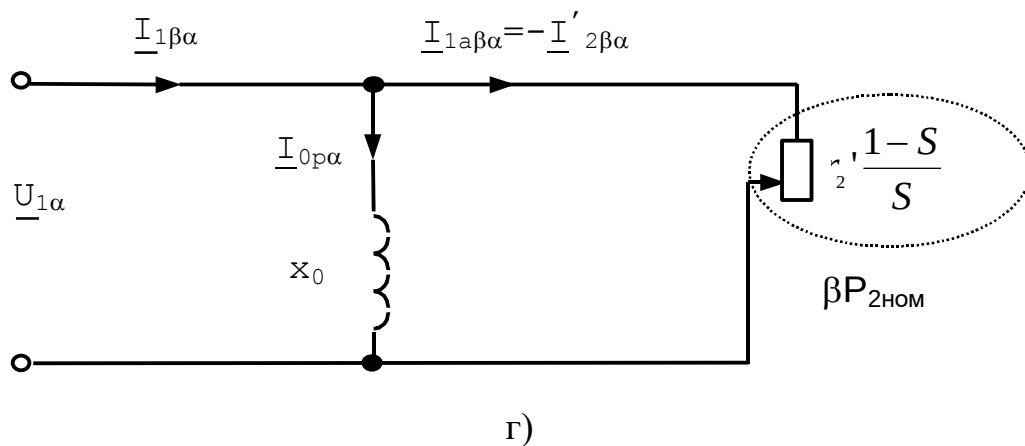
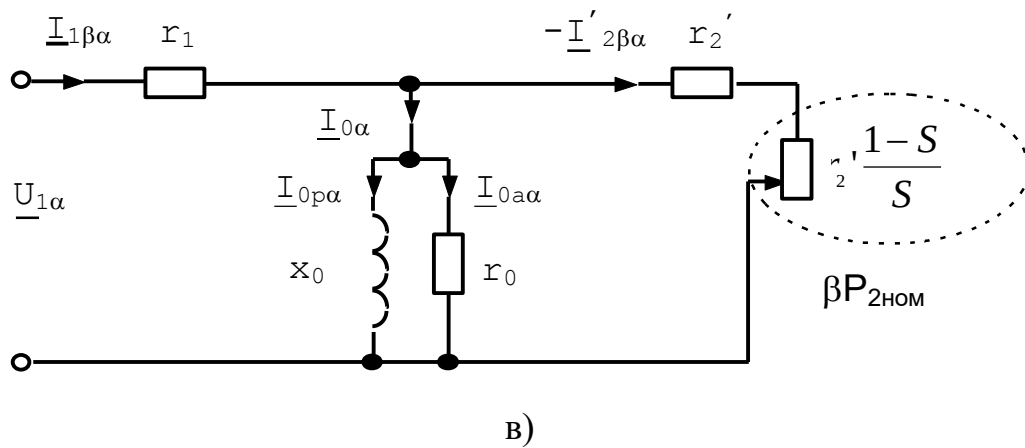


Рисунок – Схеми заміщення (моделі) асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором: а) фізична; б) зведена Т-подібна; в) зведена спрощена для розрахунків втрат активної потужності; г) для розрахунків первинних струмів.

Друга складова первинного струму є чисто реактивною, цей струм $I_{0p\alpha}$ визначається дією індуктивного опору взаємоіндукції та змінами напруги. Сумарний первинний струм

$$I_{1\beta\alpha} = \sqrt{I_{1a\beta\alpha}^2 + I_{0p\alpha}^2}$$

Втрати активної потужності в обмотці статора за моделлю по рисунку 3.1, в пропорційні квадрату струму $I_{1\beta\alpha}^2$. Втрати в обмотці ротора пропорційні квадрату струму $I_{1a\beta\alpha}^2$. Тобто

$$p_{E1\beta\alpha} = \left(\frac{I_{1\beta\alpha}}{I_{1ном}}\right)^2 p_{E1ном} = \beta_{1\beta\alpha}^2 p_{E1ном};$$

$$p_{E2\beta\alpha} = \left(\frac{I_{1a\beta\alpha}}{I_{1ном}}\right)^2 p_{E2ном}.$$

Втрати активної потужності в сталі пропорційні квадрату струму $I_{0a\alpha}^2$; в свою чергу, цей струм змінюється пропорційно до α . Тоді втрати в сталі в загальному випадку

$$p_{ст\alpha} = \alpha^2 p_{ст\text{ ном}}.$$

Для найпростішої початкової моделі аналізів тимчасово можна прийняти $I_{0p\alpha}=0$, тобто враховувати вплив лише активної складової струму $I_{1\beta\alpha}$. Тоді в моделі по рисунку 3.1, г

$$I_{1\beta\alpha} = I_{1a\beta\alpha}.$$

В моделі для розрахунків втрат по мал.3.1, в при цьому по активним опорам r_1 та r_2 протікає загальний струм, тобто вони з'єднані послідовно. Відповідно

$$r_1 + r_2' = r_k,$$

на якому виділяються сумарні втрати активної потужності $p_{E\beta\alpha}$ в обох обмотках — статора і ротора. Для уточнення розрахунків до практично придатного рівня в подальшому необхідно врахувати вплив реактивного струму I_0 . Ці етапи аналізів наводяться в наступних темах.

При аналізах слід звернути увагу на ще одну важливу обставину. В трансформаторі рівень активного навантаження β першочергово визначається регулюванням фактора γ , відповідного зміні внутрішнього активного опору r_n електрофізикохімічного технологічного пристрою ТП; в нерегульованому ТП $\gamma=1=\text{const}$. В асинхронному двигуні проблеми регулювання рівня активного навантаження не існує. Асинхронний двигун навіть при нерегульованій формі експлуатації віддає механічному технологічному пристрою ТП саме ту величину потужності $\beta \cdot P_{2\text{ ном}}$, яку механізм споживає в дану мить.

Якщо ТП не споживає активної потужності (холостий хід ТП), то це також відповідає холостому ходу двигуна; за винятком втрат потужності в механізмі ТП. Тобто, відбувається саморегуляція асинхронного двигуна; в даному випадку зі зменшенням ковзання S та відповідного збільшення активного опору двигуна $r_2 \cdot \frac{1-S}{S}$. Це несуттєво впливає на зміну швидкості обертання ротора

$$\omega = \omega_1(1-S).$$

Тому в межах нормальних навантажень можна вважати $\omega \approx \text{const}$.

3.3. Мінімізація втрат активної потужності в асинхронних двигунах

Даний попередній аналіз провадиться на найпростішій початковій моделі, тобто є гранично спрощеним для того, щоб з'ясувати вплив основних факторів β та α на енергозбережні властивості асинхронних двигунів при їх експлуатації. Такому варіанту спрощеного аналізу відповідає модель по рисунку 3.1, г при умові

$$I_0 = 0,$$

тобто при дії лише одного загального активного струму $I_{1a\beta\alpha}$.

Для цього і подальших аналізів слід від початку обумовити відмінності гранично спрощеної моделі асинхронного двигуна від гранично спрощеної моделі трансформатора за рисунком 1.8д. В трансформаторі базову вихідну вторинну потужність визначають при найбільш ефективному характері навантаження — чисто активному, тобто

$$S_{2\text{ном}} = P_{2\text{ном}}.$$

У загальному ж випадку характер вторинного струму навантаження є змішаним активно-індуктивним. Сам трансформатор споживає відносно невеликий реактивний струм.

В асинхронному двигуні характер перетворюваних потужностей інший. Потужність, яку споживає ТП від асинхронного двигуна є завжди чисто активною. Проте сам асинхронний двигун споживає досить значний реактивний струм. Тому, на відміну від трансформатора, базова активна потужність $P_{2\text{ном}}$ в асинхронному двигуні визначається при суттєвому споживанні реактивного струму і відповідному $\cos\varphi_{1\text{ном}}$. Первинний струм $I_{1\text{ном}}$ та номінальний ККД $\eta_{\text{ном}}$ також визначаються при $\cos\varphi_{1\text{ном}}$.

В даному попередньому спрощеному аналізі доцільно вважати, що при змінах рівня навантаження асинхронного двигуна залишається незмінним значення

$$\cos\varphi_1 = 1 = \text{const}.$$

В дійсності в процесі зміни рівня навантаження асинхронного двигуна $\cos\varphi_1$ теж знижується. Але врахування цього фактору занадто ускладнило б попередній аналіз. В подальших аналізах вплив змін $\cos\varphi_1$ враховується.

Певні уточнення необхідні і для інших умовно сталих величин. При достатньо точних розрахунках втрат активної потужності в сталі $p_{ст}$ необхідно враховувати не лише основні втрати, але й додаткові від пульсаційних та поверхневих проявів у зубцях статора і ротора. Але для попередніх аналізів доцільно вважати базове значення $p_{стном}$ сталим при $f_1 = \text{const}$ та $U_1 = \text{const}$, а при зміні U_1 пропорційним U_1^2 .

При досить точних розрахунках електричних втрат в обмотках p_E вони також мусять коригуватися на додаткові втрати при навантаженні, ефекти витіснення струму в пазах ротора і т. ін. Та для попередніх аналізів доцільно вважати базові величини в номінальному режимі $p_{Еном}$ сталими, а поточні значення пропорційними квадрату відносних значень струмів.

Втрати потужності в колі механічної енергії $p_{мех}$ теж доцільно вважати базовими в номінальному режимі і незмінними в інших робочих режимах при $\omega \approx \text{const}$, тобто

$$p_{мех} = p_{мехном} = \text{const} .$$

Істотно, що поточні величини $p_{мех}$ залежать від ряду факторів, першочергово від швидкості обертання ротора. Проте для попередніх аналізів можна вважати $p_{мех}$ незмінною базовою величиною.

При додержанні таких умовностей подальші аналізи можна провести на основі базових номінальних сталих величин. Тоді залежність ККД від рівня навантаження $\eta = f(\beta)$ може бути принципово виражена так же, як і для трансформаторів при чисто активному навантаженні. Відтак сумарні втрати активної потужності в номінальному режимі роботи асинхронного двигуна

$$\Sigma p_{ном} = p_{ст ном} + p_{Е ном} + p_{мех ном} .$$

Для скорочення записів позначимо їх по аналогії з попередніми аналізами

$$a = p_{ст ном}; b = p_{Е ном}; c = p_{мех ном} .$$

При $f_1 = \text{const}$ і $U_{Iном} = \text{const}$ та різних рівнях активного навантаження

$$\Sigma p_{\beta} = a + \beta^2 b + c$$

Тоді

$$\eta = 1 - \frac{a + \beta^2 b + c}{\beta P_{2ном} + a + \beta^2 b + c}$$

Визначимо величину максимального моменту η_m через відповідне значення β_m за допомогою знаходження екстремуму через першу похідну залежності $\eta=f(\beta)$, прирівняну до нуля

$$\frac{d\eta}{d\beta} = 0$$

Після проведення відповідних операцій

$$b\beta_m^2 = a + c$$

$$\beta_m^2 = \frac{a + c}{b}$$

$$\beta_m = \sqrt{\frac{a + c}{b}},$$

знак “мінус” не має сенсу.

При підстановці та впорядкування максимальне значення ККД

$$\eta_m = 1 - \frac{2\sqrt{(a + c)b}}{P_{2ном} + 2\sqrt{(a + c)b}}.$$

Для конкретного визначення критеріїв β_m та η_m необхідно знати величини $P_{2ном}$, a , b і c . Але даних щодо розподілу втрат активної потужності в номінальному режимі a , b і c , як це мало місце для трансформаторів, для асинхронних двигунів у довідниках на жаль немає. Тому необхідно відшукувати інші шляхи для визначення принаймні приблизних даних щодо розподілу a , b , і c для якогось конкретного двигуна. Про це докладніше йдеться в наступних темах, де наводяться дані про орієнтовний розподіл втрат $\Sigma p_{ном}$.

Як встановлено вище, досить суттєві можливості щодо енергозбереження з'являються при переході до більш високої форми експлуатації асинхронних двигунів – регулювання первинної напруги

$$U_{1\alpha} = \alpha \cdot U_{1ном}.$$

Регулювання напруги асинхронних двигунів зараз використовується все ширше, причому з різною метою, зокрема:

у необхідних випадках – для деякого зменшення негативних впливів пускових струмів при вмиканнях асинхронних двигунів, переважно крупних;

інколи – для зменшення споживання реактивної потужності при низьких навантаженнях двигунів, тобто для покращення $\cos\phi_1$;

ще рідше – для мінімізації споживаного струму.

В той же час, як показали проведені вище аналізи, вже наявний регулювальний пристрій можна використати більш ефективно. В процесі експлуатації двигуна, напругу можна регулювати ще й так, що не лише зменшиться споживання реактивної потужності, але й сумарні втрати активної потужності в асинхронних двигунах стануть мінімально можливими.

Зміни навантаження β задаються асинхронному двигуну механізмом ТП. На даному етапі аналізу будемо вважати, що необхідні задані рівні навантаження $\beta = \text{const}$ зберігаються на певному відносно тривалому періоді. Їм мусять відповідати рівні регулювання напруги, які залишаються сталими на тих же часових періодах. Більш динамічні зміни, що супроводжуються різними перехідними процесами, в даній дисципліні не розглядаються. Вони відносяться до проблем теорії автоматичного регулювання.

Тоді сумарні втрати активної потужності в асинхронному двигуні на незмінному щодо рівня навантаження β часовому періоді

$$\sum p_{\beta\alpha} = \alpha^2 \cdot a + \frac{\beta^2}{\alpha^2} \cdot b + c.$$

Аналіз показав, що залежність, як і відповідна залежність сумарних втрат для трансформаторів, при певному $\beta = \text{const}$ та змінному $\alpha = \text{var}$ може забезпечуватись при будь-яких значеннях α . Але лише при одному значенні α_m настає мінімум сумарних втрат активної потужності $\sum p_{\beta\alpha \min}$ (рисунок 2.5).

За правилами визначення екстремумів знаходимо α_m , при якому настає мінімум втрат активної потужності

$$\frac{d(\sum p_{\beta\alpha})}{d\alpha} = 0.$$

Після впорядкування

$$\alpha_m^4 = \beta^2 \cdot \frac{b}{a}; \quad \alpha_m^2 = \beta \cdot \sqrt{\frac{b}{a}}.$$

$$\alpha_m = \sqrt{\beta \cdot \sqrt{\frac{b}{a}}} = \sqrt{\beta} \cdot \sqrt[4]{\frac{b}{a}};$$

знак “мінус” не має сенсу. Значення α_m для асинхронного двигуна відповідає аналогічному критерію α_m для трансформаторів. Підстановка визначає

$$\sum p_{\beta\alpha \min} = 2 \cdot \beta \cdot \sqrt{a \cdot b} + c.$$

Значення мінімальних втрат в асинхронних двигунах відрізняється від мінімальних втрат для трансформаторів, на величину $c=p_{\text{мех}}$.

Різниця сумарних втрат потужності, які мають місце при нерегульованій експлуатації при умові $U_{1\text{ном}}=\text{const}$, а також втрат при регульованій експлуатації при $U_{1\alpha}=\alpha \cdot U_{1\text{ном}}=\text{var}$ становить

$$\begin{aligned}\Delta \sum p &= \sum p_{\beta} - \sum p_{\beta \alpha \min} = (a + \beta^2 \cdot b + c) - (2 \cdot \beta \cdot \sqrt{a \cdot b} + c) = a - 2 \cdot \beta \cdot \sqrt{a \cdot b} + \beta^2 \cdot b = \\ &= (\sqrt{a} - \beta \cdot \sqrt{b})^2 = (\beta \cdot \sqrt{b} - \sqrt{a})^2 = b \cdot \left(\sqrt{\frac{a}{b}} - \beta \right)^2.\end{aligned}$$

Критерії α_m , $\sum p_{\beta \alpha \min}$ та $\Delta \sum p$ дають основу для оцінок можливої економії, тобто ефективності енергозбереження при переході від нерегульованої до регульованої форми експлуатації асинхронних двигунів. В наступній темі розглядаються методи уточнення їх значень шляхом врахування впливу реактивних струмів.

3.4 Врахування впливу реактивних струмів на енергозбережні властивості асинхронних двигунів

В даній темі доцільно з'ясувати взаємозв'язки активних струмів при різних рівнях активного навантаження, дії фактора регулювання α та змінному впливі реактивних струмів. Аналіз провадиться за моделлю по рисунку 3.1 г. В номінальному режимі при $U_1=U_{1\text{ном}}$ та $P_2=P_{2\text{ном}}$ струм в основній навантажувальній гілці, відповідній вторинній стороні, є чисто активним

$$I'_{2\text{аном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}.$$

В загальному режимі при $P_{2\beta} = \beta P_{2\text{ном}} = \beta U_{1\text{ном}} I'_{2\text{аном}}$ та $U_{1\alpha} = \alpha U_{1\text{ном}}$ цей струм

$$I'_{2\alpha\beta} = \frac{\beta P_{2\text{ном}}}{\alpha U_{1\text{ном}}} = \frac{\beta U_{1\text{ном}} I'_{2\text{аном}}}{\alpha U_{1\text{ном}}} = \frac{\beta}{\alpha} \cdot I'_{2\text{аном}}.$$

Тоді рівень струмового навантаження в цій гілці

$$\beta_2 = \frac{I'_{2\alpha\beta}}{I'_{2\text{аном}}} = \frac{\beta I'_{2\text{аном}}}{\alpha \cdot I'_{2\text{аном}}} = \frac{\beta}{\alpha};$$

відповідно квадратичне значення, потрібне для визначення втрат активної потужності в обмотці ротора,

$$\beta_2^2 = \frac{\beta^2}{\alpha^2}.$$

Тепер необхідно визначити рівень струмового навантаження β_1 в гілці, відповідній обмотці статора, тобто первинній стороні

$$\beta_1 = \frac{I_{1\beta\alpha}}{I_{1ном}}$$

Струм $I_{1\beta\alpha}$ складається з чисто активного струму в навантажувальній гілці.

$I_{1a\beta\alpha} = -I'_{2\beta\alpha}$ (їх діючі значення є однаковими) та чисто реактивного струму в поперечній намагнічувальній гілці $I_{0p\alpha}$. Їх сума

$$I_{1\beta\alpha} = \sqrt{I_{1a\beta\alpha}^2 + I_{0p\alpha}^2}.$$

У відповідності струм $I_{1\beta\alpha}$ та його складові $I_{1a\beta\alpha}$ та $I_{0p\alpha}$ бажано виразити через величину $I_{1ном}$. Струм $I_{1a\beta\alpha}$ у відповідності

$$I_{1a\beta\alpha} = I_{2a\beta\alpha} = \frac{\beta}{\alpha} \cdot I_{1аном} = \frac{\beta}{\alpha} \cdot I_{1ном} \cdot \cos \varphi_{1ном} = \frac{\beta}{\alpha} \cdot k \cdot I_{1ном},$$

де $k = \cos \varphi_{1ном}$. Відповідно квадратичне значення струму

$$I_{1a\beta\alpha}^2 = \frac{\beta^2 k^2}{\alpha^2} I_{1ном}^2$$

Для знаходження $I_{1\beta\alpha}$ необхідно визначити реактивний струм $I_{0p\alpha}$ через $I_{1ном}$. Струм $I_{0p\alpha}$ малосуттєво залежить від рівня навантаження β , проте він змінюється пропорційно α

$$I_{0p\alpha} = \frac{\alpha \cdot U_{1ном}}{x_0} = \alpha \cdot I_{0pном}.$$

Значення струму $I_{орном}$ можна знайти з виразу для $k = \cos \varphi_{1ном}$ в номінальному режимі

$$k = \cos \varphi_{1ном} = \frac{I_{1аном}}{\sqrt{I_{1аном}^2 + I_{0pном}^2}};$$

звідки після зведення в квадрат лівої і правої частин

$$I_{орном}^2 = I_{1аном}^2 \frac{1 - k^2}{k^2}.$$

Квадрат струму поперечної гілки

$$I_{0p\alpha}^2 = \alpha \cdot I_{1\text{аном}}^2 \frac{1-k^2}{k^2}.$$

Залежність $I_{1\text{аном}}$ від $I_{1\text{ном}}$

$$I_{1\text{аном}} = I_{1\text{ном}} \cos \varphi_{1\text{ном}} = k \cdot I_{1\text{ном}}.$$

З врахуванням вказаних зв'язків

$$I_{0p\alpha}^2 = \alpha^2 \cdot k^2 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \frac{1-k^2}{k^2} = \alpha^2 (1-k^2) \cdot I_{1\text{ном}}^2.$$

Тепер можна визначити струм $I_{1\beta\alpha}$ в загальній гілці, підставивши в неї значення відповідних квадратів струмів

$$I_{1\beta\alpha} = \sqrt{\frac{\beta^2 k^2}{\alpha^2} + \alpha^2 (1-k^2)} \cdot I_{1\text{ном}}.$$

Значення рівня струмового навантаження в загальній гілці

$$\beta_1 = \frac{I_{1\beta\alpha}}{I_{1\text{ном}}} = \sqrt{\frac{\beta^2 k^2}{\alpha^2} + \alpha^2 (1-k^2)};$$

відповідне квадратичне значення, потрібне для визначення втрат активної потужності обмотки статора

$$\beta_1^2 = \frac{\beta^2 k^2}{\alpha^2} + \alpha^2 (1-k^2).$$

Таким чином, в моделях асинхронних двигунів, наближених до реальних, вплив реактивних струмів на основні величини є досить суттєвим. Зокрема це знаходить відображення у величинах загального струму в обмотці статора $I_{1\beta\alpha}$ за та коефіцієнті навантаження для цього струму β_1 .

Зміни величин втрат активної потужності в обмотці статора пропорційні β_1^2 ; зміни величин втрат в обмотці ротора пропорційні β_2^2 ; зміни величин втрат в сталі пропорційні квадрату коефіцієнта навантаження в цій гілці, тобто змінам струму $I_{0p\alpha}$ в квадраті, що становлять α^2 . Втрати потужності в механічному колі є незмінними. Тоді сумарні втрати активної потужності в регульованому асинхронному двигуні

$$\Sigma p_{\beta\alpha} = \alpha^2 a + \left[\frac{\beta^2 k^2}{\alpha^2} + \alpha^2 (1-k^2) \right] b_1 + \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2} \right) b_2 + c.$$

По аналогії з попередніми аналізами знаходимо α_m , відповідне мінімуму втрат, за загальними правилами визначення екстремумів

$$\frac{d(\Sigma p_{\beta\alpha})}{d\alpha} = 0.$$

Після проведення операцій і впорядкування

$$\alpha_m^4 = \beta^2 \frac{b_1 k^2 + b_2}{a + b_1(1 - k^2)}.$$

Для скорочення записів позначимо

$$A = a + b_1(1 - k^2),$$

$$B = b_1 k^2 + b_2;$$

тоді

$$\alpha_m^2 = \beta \sqrt{\frac{B}{A}}$$

$$\alpha_m = \sqrt{\beta} \cdot \sqrt[4]{\frac{B}{A}},$$

знак “мінус” не має сенсу. В загальному записі цей критерій є аналогічним, відповідного гранично спрощеній моделі.

Значення мінімальних сумарних втрат потужності в асинхронному регульованому двигуні визначається підстановкою α_m . Після впорядкування

$$\Sigma p_{\beta\alpha \min} = 2\beta\sqrt{AB} + c.$$

В загальному записі цей критерій є аналогічним, відповідного гранично спрощеній моделі.

Згідно з прийнятими схемами аналізів слід визначити різницю втрат активної потужності $\Delta \Sigma p$ між нерегульованою та регульованою формами експлуатації. Але втрати для нерегульованої моделі з врахуванням впливу реактивних струмів поки що не визначені. Їх можна знайти, ввівши до неї значення $\alpha=1=\text{const}$. Тоді

$$\Sigma p_{\beta} = a + [\beta^2 k^2 + 1 - k^2] \cdot b_1 + \beta^2 b_2 + c = A + \beta^2 B + c$$

Різниця сумарних втрат потужності при нерегульованій та регульованій за формах експлуатації

$$\Delta \Sigma p = A + \beta^2 \cdot B + c - 2\beta \cdot \sqrt{AB} - c = (\sqrt{A} - \beta\sqrt{B})^2 = B \cdot \left(\sqrt{\frac{A}{B}} - \beta\right)^2$$

Критерії α_m , $\Sigma p_{\beta \min}$ та $\Delta \Sigma p$ дозволяють провести розрахунки можливої економії, тобто ефективності енергозбереження при переході від нерегульованої до регульованої форми експлуатації асинхронних двигунів. Значення ККД при мінімальних втратах потужності буде максимальним, але залежним від рівня навантаження β .

$$\eta_m = 1 - \frac{2 \cdot \beta \cdot \sqrt{AB} + c}{\beta \cdot P_{2ном} + 2 \cdot \beta \cdot \sqrt{AB} + c}.$$

В (3.49) чисельник і знаменник можна скоротити на β , тоді

$$\eta_m = 1 - \frac{2 \cdot \sqrt{AB} + \frac{c}{\beta}}{P_{2ном} + 2 \cdot \sqrt{AB} + \frac{c}{\beta}}.$$

Мінімальні сумарні втрати активної потужності $\Sigma p_{\beta \min}$ в сучасних асинхронних двигунах середньої і вищої потужності в номінальному режимі складають не більше $0,15 P_{2ном}$, а втрати механічної потужності c – не більше $0,03 P_{2ном}$. Тому при регулюванні напруги за критерієм мінімуму втрат активної потужності α_m на всьому діапазоні змін β залишається $\eta = \eta_m$. Його величина є майже сталою, незначно зменшуючись при зниженні рівня навантаження.

Доцільно розглянути також зміни споживання реактивної потужності при такому регулюванні. При $U_1 = U_{1ном} = \text{const}$ значення $\cos \varphi_{1\beta}$ суттєво залежить від рівня навантаження β . Відповідно до обраної аналітичної моделі по рисунку 3.1, г в номінальному режимі

$$k = \frac{I_{1аном}}{\sqrt{I_{1аном}^2 + I_{орном}^2}}.$$

при навантаженні β

$$k_\beta = \frac{I_{1a\beta}}{\sqrt{I_{1a\beta}^2 + I_{op\beta}^2}}.$$

Можна звести в квадрат ліві і праві частини; в кожному з виразів визначити квадрати реактивних струмів I_{op}^2 та прирівняти їх, оскільки цей реактивний струм при $\alpha = 1 = \text{const}$ не залежить від рівня навантаження

$$I_{1аном}^2 \frac{1 - k^2}{k^2} = I_{1a\beta}^2 \frac{1 - k_\beta^2}{k_\beta^2}.$$

З врахуванням та після впорядкування

$$k_{\beta} = \sqrt{\frac{\beta^2 k^2}{\beta^2 k^2 + (1 - k^2)}}.$$

Розрахована залежність при $k=0,9$ та $\alpha=1$ показана на рисунку 3.2 (характеристика 1).

При регулюванні за критерієм

$$\alpha_m = \sqrt{\beta^4 \frac{B}{A}}$$

споживана реактивна потужність відповідно

$$Q_{\alpha} = I_{op\alpha}^2 x_0 \equiv \alpha^2_m \equiv \beta$$

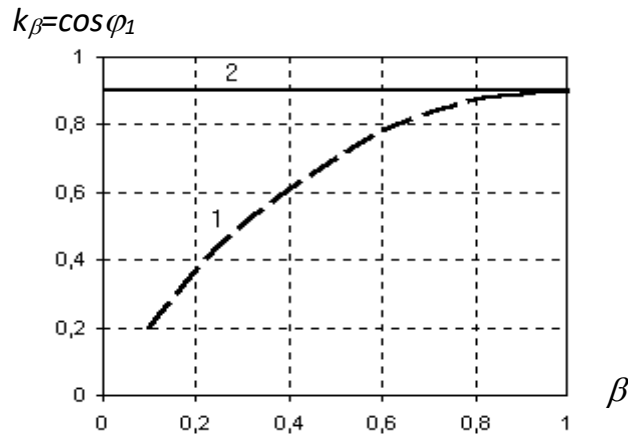


Рисунок 3.2 – Характеристики $\cos \varphi_1 = f(\beta)$:

1- при $\alpha=1=\text{const}$; 2 - при $\alpha_m=\text{var}$.

знижується зі зменшенням β . Для визначення $k_{\beta\alpha} = \cos \varphi_{1\beta\alpha}$ можна підставити відповідні значення основного активного $I_{1a\beta\alpha}$ за (3.31) та реактивного $I_{op\alpha}$ струмів у загальному випадку

$$\cos \varphi_{1\beta\alpha} = \frac{I_{1a\beta\alpha}}{\sqrt{I_{1a\beta\alpha}^2 + I_{op\alpha}^2}} = \frac{\frac{\beta}{\alpha} k}{\sqrt{\frac{\beta^2}{\alpha^2} k^2 + \alpha^2 (1 - k^2)}};$$

з врахуванням (3.45) після впорядкування

$$\cos \varphi_{1\beta\alpha} = \frac{k}{\sqrt{k^2 + \frac{B}{A}(1 - k^2)}} = \text{const},$$

тобто при регулюванні $\alpha = \alpha_m \cos \varphi_1$ не залежить від β і для даного конкретного двигуна є сталою величиною (характеристика 2 на рисунку 3.2).

Таким чином, регулювання напруги за критерієм

$$\alpha_m = \sqrt{\beta^4 \sqrt{\frac{B}{A}}}$$

дає такі переваги у порівнянні з нерегульованою формою експлуатації асинхронних двигунів:

дозволяє логічно змінювати напругу в залежності від рівня споживання активної потужності - чим більше рівень споживання активної потужності, тим вищим є і рівень живильної напруги; тим відносно нижчими є втрати на передачу потужності у всьому колі електричної енергії;

мінімізує сумарні втрати активної потужності при $f_1 = \text{const}$ в електротехнічних пристроях, в тому числі і в асинхронних двигунах; у всьому діапазоні змін β двигуни експлуатуються майже при незмінному $\eta = \eta_m$;

суттєво знижує споживання реактивного струму; при цьому двигуни експлуатуються при незмінному $\cos \varphi_{1\beta\alpha} = \cos \varphi_{1\text{ном}} = \text{const}$;

значно зменшує негативні впливи комутаційних, пускових та інших перехідних процесів.

У зв'язку з такими перевагами регульованої форми експлуатації асинхронних двигунів з короткозамкненими ротором доцільно детальніше розглянути і практично оцінити у грошових вимірах енергозбережні можливості при її застосуванні. Для прикладу в наступній темі розглядається розрахунок потенційно можливої економії від зменшення втрат активної потужності на конкретному двигуні при переході від нерегульованої до регульованої форми експлуатації при регулюванні напруги за критерієм

$$\alpha_m = \sqrt{\beta^4 \sqrt{\frac{B}{A}}} \quad .$$

3.5 Ефективність енергозбережного регулювання напруги в асинхронних двигунах

Для визначення ефективності енергозбережного регулювання напруги щодо конкретного асинхронного двигуна необхідно знайти розподіл в ньому основних втрат активної потужності в номінальному режимі a , b_1 , b_2 та c . За відсутністю цих даних в довідниках виникає потреба у визначенні такого

розподілу іншими методами. Є принаймні три реальних методи визначення розподілу втрат потужності для конкретного двигуна:

провести необхідні експериментальні випробування по визначенню розподілу втрат; це найбільш достовірний і надійний метод, але його реальне застосування можливе лише при наявності відповідних умов;

провести перевірочний розрахунок двигуна; при сходженні основних заданих експлуатаційних величин його визначення втрат в номінальному режимі будуть досить близькими до реальних; але для таких розрахунків потрібен відповідний професійний рівень; розрахункові дані про розподіл втрат потужності в номінальному режимі для деяких широко використовуваних асинхронних двигунів з короткозамкненими роторами серії 4А основного використання наведені в таблиці 3.1;

для орієнтованих розрахунків можна скористатись середньостатистичними рівнями відповідних втрат відносно сумарних втрат потужністю в номінальному режимі $\Sigma p_{\text{ном}}$; на основі цього методу запропоновані узагальнені аналітичні співвідношення і графічні залежності базових відносних величин для подальших простих практичних розрахунків.

Таблиця 3.1

Розподіл втрат активної потужності в номінальному режимі асинхронних двигунів з короткозамкненими роторами серії 4А основного виконання при напрузі 220/380В

N п/п	$P_{2\text{ном}}$ кВт	p_1 об/хв	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos\varphi_{1\text{ном}}$	a кВт	b_1 кВт	b_2 кВт	c кВт
1	4	1000	0,84	0,79	0,242	0,290	0,281	0,014
2	4	3000	0,87	0,91	0,219	0,252	0,113	0,072
3	11	1000	0,88	0,875	0,301	0,896	0,319	0,092
4	11	3000	0,88	0,9	0,240	0,893	0,258	0,130
5	15	1500	0,89	0,910	0,354	0,897	0,426	0,117
6	18,5	1500	0,89	0,89	0,470	1,169	0,417	0,125
7	30	1500	0,91	0,88	0,555	1,546	0,799	0,127

8	30	3000	0,90	0,92	0,597	1,533	0,720	0,156
9	37	3000	0,90	0,91	0,730	1,540	0,770	0,186
10	45	1500	0,92	0,92	0,750	1,980	0,844	0,205

З аналізу даних перевірочних розрахунків асинхронних двигунів з короткозамкненими роторами серії 4А найбільш широко використовуваних потужностей впливає що відносний склад кожного виду втрат у сумарних втратах в номінальному режимі є порівняно стабільним. Тому для орієнтовних розрахунків можна створити узагальнену модель втрат потужності для вказаної групи асинхронних двигунів. Приблизні усереднені дані для номінального режиму є такими:

$$a \approx 0,25 \Sigma p_{ном},$$

$$b_1 \approx 0,45 \Sigma p_{ном},$$

$$b_2 \approx 0,2 \Sigma p_{ном},$$

$$c \approx 0,1 \Sigma p_{ном}.$$

На основі проведених вище аналізів можна встановити взаємозв'язок між цими величинами в процесі регульованої експлуатації. Сумарні втрати активної потужності

$$\Sigma p_{\beta\alpha} = \alpha^2 \cdot 0,25 \Sigma p_{ном} + \left[\frac{\beta^2 \cdot k^2}{\alpha^2} + \alpha^2 \cdot (1 - k^2) \right] \cdot 0,45 \Sigma p_{ном} + \frac{\beta^2}{\alpha^2} \cdot 0,2 \Sigma p_{ном} + 0,1 \Sigma p_{ном},$$

або у відносних значеннях

$$\frac{\Sigma p_{\beta\alpha}}{\Sigma p_{ном}} = 0,25\alpha^2 + 0,45 \left[\frac{\beta^2 k^2}{\alpha^2} + \alpha^2 (1 - k^2) \right] + 0,2 \frac{\beta^2}{\alpha^2} + 0,1.$$

Після впорядкування щодо змінних величин

$$\frac{\Sigma p_{\beta\alpha}}{\Sigma p_{ном}} = \alpha^2 [0,25 + 0,45(1 - k^2)] + \frac{\beta^2}{\alpha^2} (0,45k^2 + 0,2) + 0,1$$

Позначимо постійні коефіцієнти скорочено

$$A = 0,25 + 0,45(1 - k^2);$$

$$B = 0,2 + 0,45k^2;$$

тоді

$$\frac{\sum p_{\beta\alpha}}{\sum p_{ном}} = \alpha^2 A + \frac{\beta^2}{\alpha^2} B + 0,1.$$

Значення α при $\sum p_{\beta\alpha \min}$

$$\alpha_m = \sqrt{\beta^4 \frac{B}{A}}.$$

Для орієнтовних розрахунків можна скористатись середньостатистичним значенням $k = \cos \varphi_{ном} = 0,9$. При цьому постійні коефіцієнти набирають конкретних значень

$$A = 0.335,$$

$$B = 0.562.$$

Відповідно

$$\alpha_m = 1.135\sqrt{\beta}.$$

Мінімальне значення сумарних втрат активної потужності

$$\frac{\sum p_{\beta\alpha \min}}{\sum p_{ном}} = 2\beta\sqrt{AB} + C = 2\beta \cdot 0,435 + 0,1 = 0,87\beta + 0,1.$$

Сумарні втрати активної потужності при традиційній нерегульованій формі експлуатації згідно з (3.47), віднесені до номінальних

$$\frac{\sum p_{\beta\alpha}}{\sum p_{ном}} = A + \beta^2 B + C = 0,335 + 0,562 \cdot \beta^2 + 0,1 = 0,435 + 0,562 \cdot \beta^2.$$

Відносне зменшення втрат активної потужності при переході від нерегульованої до регульованої форми експлуатації при використанні критерію регулювання напруги α_m

$$\frac{\Delta \sum p}{\sum p_{ном}} = \frac{\sum p_{\beta}}{\sum p_{ном}} - \frac{\sum p_{\beta\alpha \min}}{\sum p_{ном}} = B \cdot \left(\sqrt{\frac{A}{B}} - \beta \right)^2 = 0,562 \cdot \left(\sqrt{\frac{0,335}{0,562}} - \beta \right)^2 = 0,562 \cdot (0,77 - \beta)^2. \quad (3.66)$$

Підставляючи поточні значення β від $\beta=1,0$ до $\beta=0,05$ (режим, близький до холостого ходу) отримаємо графічну залежність відносної різниці втрат активної потужності $\frac{\Delta \sum p}{\sum p_{ном}} = f(\beta)$, показану на рисунку 3.3 (характеристика 4).

На тому ж рисунку показані вихідні залежності $\frac{\sum p_{\beta}}{\sum p_{ном}} = f(\beta)$ для нерегульованої форми (характеристика 2) та, відповідно $\frac{\sum p_{\beta \alpha_{\min}}}{\sum p_{ном}} = f(\beta)$ (характеристика 3). Показана також відносна залежність регулювання напруги за критерієм α_m для досягнення мінімальних втрат активної потужності у вигляді $\alpha_m = f(\beta)$ (характеристика 1).

Залежності по рисунку 3.3 є узагальненими орієнтовними для асинхронних двигунів з короткозамкненими роторами основного виконання серії 4А. Вони можуть бути корисними і при розрахунках асинхронних двигунів інших серій, близьких за властивостями - серій 4АМ, АИ, РА та ін. Залежності спеціально представлені універсальними, тобто виконаними у відносних одиницях. Це дає можливість застосувати їх до будь-якого конкретного двигуна з вказаної групи.

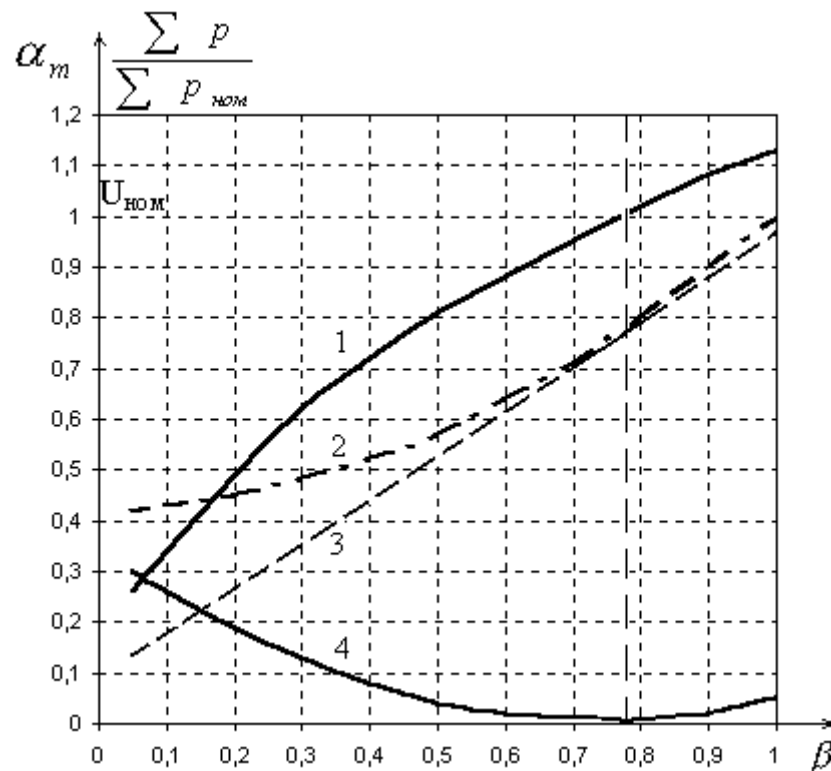


Рисунок 3.3 – Узагальнені відносні характеристики визначення зниження втрат активної потужності в асинхронних двигунах при регулюванні напруги за

$$\text{критерієм } \alpha_m = \sqrt{\beta^4 \frac{B}{A}}.$$

Для такого двигуна необхідно знати лише сумарні втрати активної потужності в номінальному режимі $\sum p_{ном}$. Інших даних для цих розрахунків не потрібно. В характеристиках взяті усереднене значення $k = \cos \varphi_{I_{ном}} = 0,9$. За

бажанням з допомогою в залежності можна внести інше реальне значення k через коефіцієнти A і B . При іншому розподілі втрат в номінальному режимі можна внести відповідні зміни. До того ж, при реальному виконанні такого регулювання все рівно потрібна додаткова корекція α_m на компенсацію факторів, не врахованих вихідною моделлю – вплив опорів розсіювання, нелінійностей, ефектів витіснення струмів в обмотках роторів при частих пусках двигуна та інших особливостей.

Для конкретизації розрахункових методів візьмемо асинхронний двигун з вказаної групи, у якого сумарні втрати активної потужності в номінальному режимі становлять $\sum p_{ном} = 10$ кВт. Такі втрати відповідають двигуну з номінальною потужністю $P_{2ном} = 110 \dots 120$ кВт. Припустимо, що цей двигун працює циклічно за навантажувальною діаграмою, показаної на рисунку 3.4, на протязі 8-годинної робочої зміни при $t_1 = t_2 = t_3 = t_4$.

Середнє навантаження двигуна за один цикл з чотирьох рівних часових періодів $t_1 \dots t_4$ становить

$$\beta_{cp} = \frac{0.1 + 1.0 + 0.1 + 0.05}{4} = 31.2\%$$

За традиційними існуючими рекомендаціями такий двигун треба було б замінити на менш потужний. Але цьому заважає ряд причин:

придбання нового двигуна меншої потужності призведе до суттєвих додаткових витрат;

експлуатація нового двигуна у періоді 2 при $\beta = 1.0$, що відповідає потужності 110...120 кВт, призведе до перевантаження і скорочення терміну експлуатації такого нового двигуна;

не виключено, що при зміні технологічного процесу існуючий двигун має працювати при більш високому навантаженні.

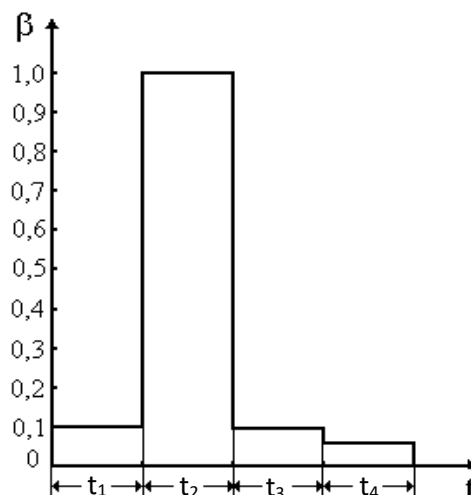


Рисунок 3.4 – Циклічна навантажувальна діаграма асинхронного двигуна.

Якщо залишити існуючий двигун, то зменшення втрат активної потужності в регульованому режимі експлуатації можна визначити так. За 8-годинну робочу зміну кожний період циклічної діаграми буде тривати $8/4=2$ год.

За характеристикою 4 рисунку 3.3 знаходимо відносну частину, на яку можна зменшити сумарні втрати при застосуванні регулювання α_m :

період 1 – 0,252;

період 2 – немає;

період 3 – 0,252;

період 4 – 0,293.

В періоді 2 при певному навантаженні економії немає. Період 4 практично відповідає режиму холостого ходу. Це час, що витрачається на заміну інструменту, деталі, розвантаження технологічного пристрою і ін. Механізм звичайно зупиняють вимиканням двигуна. При новому циклі відбувається новий пуск. Більш сучасні засоби, в тому числі електромагнітні муфти, дозволяють роз'єднати вали механізму і двигуна. При цьому механізм зупиняється, а двигун не вимикається і не потребує нових пусків. Втрати за період 4 можна вважати відповідними $\beta=0,05$.

З врахуванням базової величини $\sum p_{ном} = 10 \text{ кВт}$ та однакових 2-годинних сумарних періодів потенційно можлива економія електроенергії становить:

Період 1.- $0,252 \cdot 10 \cdot 2 = 5.0 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Період 2.-немає

Період 3.- $0,252 \cdot 10 \cdot 2 = 5.0 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Період 4.- $0,293 \cdot 10 \cdot 2 = 6.0 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Всього 16,0 кВт·год.

При ціні 0,25 грн. за одну кіловат-годину економія за зміну може скласти 4,0 грн.

При зниженні напруги також суттєво зменшується споживання реактивної потужності. З загальновідомих співвідношень

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{P_1 + jQ_1},$$

звідки $Q_1 = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1}$. В номінальному режимі за абсолютною величиною при $k=0,9$ $Q \approx 0,5P_1$. Тобто споживана в номінальному режимі реактивна потужність при $P_{I_{ном}} = P_{2_{ном}} + \Sigma p_{ном} \approx 125$ кВт становить $Q_{I_{ном}} \approx 63 \text{ кВт} \cdot \text{Ар}$.

Зі зменшенням напруги $Q_{1\alpha}$ знижується пропорційно α_m^2 . Величину α_m можна знайти по $\alpha_m = f(\beta)$ рисунок 3.3 для кожного з чотирьох періодів. При цьому необхідно врахувати таке. В періоді 2 зменшення втрат активної потужності не було тому, що регулювання напруги понад $\alpha_m=1$, зокрема до рівня $\alpha_m=1.135$ при $\beta=1$, є недоцільним з-за невеликої економії на споживанні активної потужності та різкого збільшення споживання реактивної потужності. При $\alpha_m=1$ в другому періоді з $\beta=1$ зменшення споживання реактивної потужності не буде.

Розрахунки економії у споживанні реактивної енергії за три двогодинні періоди E_{pe} зведені в таблицю 3.2:

Таблиця 3.2

Споживанні реактивної енергії

	β	α_m	α_m^2	$Q_{1\alpha}$ кВ·Ар	$Q_{I_{ном}} - Q_{1\alpha}$ кВ·Ар	E_{pe}	
						кВ·Ар·г од	грн.
Період1	0,1	0,36	0,13	6,1	56,9	113,8	1,14
Період3	0,1	0,36	0,13	6,1	56,9	113,8	1,14
Період4	0,05	0,253	0,064	4,0	59,0	118	1,18
Всього							3,46

Сумарна економія від зменшення споживання активної і реактивної енергії за одну 8-годинну робочу зміну становить $4,0 \text{ грн} + 3,46 \text{ грн} = 7,46 \text{ грн}$. При 300 робочих днів на рік: при одностійній роботі – 2240 грн.; при двостійній – 4480 грн.; при трестійній – 6720 грн. Така економія приблизно відповідає ціні розглядуваного двигуна.

4. МЕТОДИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ МІСЦЕВИМ ПІДВИЩЕННЯМ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Зниження якості електричної енергії суттєво погіршує експлуатаційні властивості електромеханічних пристроїв, особливо асинхронних двигунів. В першу чергу це стосується небажаних змін моментних характеристик $M = f(s)$ асинхронних двигунів. До того ж у них суттєво збільшуються втрати активної потужності, а також відповідна оплата за спожиту електричну енергію. Одночасно активні частини під дією збільшених втрат активної потужності перегріваються понад встановлені нормативи. Це призводить до скорочення терміну використання двигунів, збільшення частоти їх аварійності.

Рівень якості електричної енергії характеризується цілим рядом основних величин. Існуючими державними стандартами встановлюються певні граничні показники на відхилення основних величин від встановлених нормативів. Чотири таких показники є найбільш важливими. Фахівці з експлуатації електромеханічного обладнання мусять їх знати й враховувати наслідки відхилень цих показників від їх основних базових значень. Тому доцільно принаймні коротко розглянути ці показники та їх вплив на енергозбережні експлуатаційні властивості асинхронних двигунів та трансформаторів.

При цьому слід зважити на суттєві сучасні обставини. Припустимі відхилення основних величин нормативів, що встановлювалися державними стандартами, на протязі багатьох років були досить жорсткими. З врахуванням сучасних реальних обставин міжнародним стандартом 13109-97 “Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення” встановлено два види норм якості електроенергії: нормально припустимі і гранично припустимі.

Найбільш суттєвим з них є чотири показники:

відхилення напруги на виводах приймачів електричної енергії:

нормально припустимі $\pm 5\%$,

гранично припустимі $\pm 10\%$;

несинусоїдальність напруги характеризується двома показниками:

коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги,

коефіцієнтом n -ї гармонічної складової напруги;

зокрема коефіцієнти спотворення для $U_{\text{ном}}=0,38$ кВ: нормально припустимі 8,0%, гранично припустимі 12%, для більш високих напруг вони знижуються; нормально припустимі коефіцієнти n -ї гармонічної залежать від парності гармонік та величин $U_{\text{ном}}$ і становлять від 6 і нижче відсотків; їх гранично припустима величина збільшується в 1,5 рази;

несиметрія напруг характеризується також двома показниками:

коефіцієнтом несиметрій напруг за зворотною послідовністю, нормально і гранично припустимі його значення в точках загального приєднання до електричних мереж становлять 2,0 та 4,0% відповідно;

коефіцієнтом несиметрій напруг за нульовою послідовністю, нормально і гранично припустимі його значення в точках загального приєднання до чотирипроводних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ становлять 2,0 та 4,0% відповідно;

відхилення частоти, нормально і гранично припустимі його значення становлять $\pm 0,2$ та $\pm 0,4$ Гц відповідно.

Показник відхилення частоти має дуже важливе значення для загальних електроенергетичних систем і в основному визначається реальним сумарним навантаженням діючих електростанцій. Але при використанні місцевих резервних джерел електроенергії на виробництвах його теж необхідно дотримуватись.

Досить жорсткі допуски державних стандартів на показники якості електричної енергії обумовлені значними негативними впливами, які виникають при перебільшенні встановлених допусків. Навіть у межах нормативних допусків при несприятливому співпаданні відхилень негативний вплив може бути дуже суттєвим.

Підтвердженням цьому є наслідки спеціальних досліджень [7]. Вони показали, що у варіанті співпадання відхилень основних величин навіть у межах стандартних допусків ККД асинхронних двигунів помітно знижується. Так, при допусках $U_1 = 1,1U_{1\text{ном}}$, усередненому коефіцієнті несинусоїдальності $k_{\text{нс}} = 5\%$, усередненому коефіцієнті несиметрії напруг $\mathcal{E} = 2\%$ та $f = f_{\text{ном}}$, а також при середньостатистичному рівні навантаження асинхронних двигунів близько $P_{2\beta} = 0,6P_{2\text{ном}}$ їх ККД може знижуватися більше, ніж на 5%.

Сам по собі цей показник зниження ККД мало що роз'яснює. Наочніше наслідки зниження якості електроенергії навіть у межах стандартів видно з конкретного розрахунку. Для прикладу можна взяти розглянутий вище

асинхронний двигун з такими номінальними даними: $P_2 = 110 \text{ кВт}$; $\eta_{\text{ном}} = 0,92$; $\cos \varphi_{1\text{ном}} = 0,9$; $\sum p_{\text{ном}} = 10 \text{ кВт}$. Згідно з проведеними вище аналізами сума втрат активної потужності при рівні навантаження β та сталій напрузі

$$\sum p_{\beta} = a + [\beta^2 k + 1 - k^2] \cdot b_1 + \beta^2 b_2 + c.$$

При прийнятому розподілі втрат в номінальному режимі: $a = 0,25 \sum p_{\text{ном}}$; $b_1 = 0,45 \sum p_{\text{ном}}$; $b_2 = 0,2 \sum p_{\text{ном}}$; $c = 0,1 \sum p_{\text{ном}}$; $k = 0,9$ та $\beta = 0,6$

$$\sum p_{\beta} = 0,25 + [0,36 \cdot 0,81 + 1 - 0,81] \cdot 0,45 + 0,36 \cdot 0,2 + 0,1 = 0,642 \sum p_{\text{ном}}.$$

При переводі в абсолютні значення сумарні втрати при $\beta = 0,6$ і нульових відхиленнях величин якості електричної енергії становлять $\sum p_{\beta_0} = 6,42 \text{ кВт}$. ККД

$$\eta_0 = \frac{\beta P_{2\text{ном}}}{\beta P_{2\text{ном}} + \sum p_{\beta_0}} = \frac{0,6 \cdot 110}{0,6 \cdot 110 + 6,42} = 0,91.$$

Тепер визначимо реальні втрати активної потужності, які будуть у цьому двигуні при вказаних вище граничних допусках. Якщо реальний ККД знизиться на 5%, то

$$\eta_p = \eta_0 - 5\% = 0,91 - 0,05 = 0,86.$$

Виходячи з умов, що відповідні значення ККД

$$\eta_0 = 1 - \frac{\sum p_{\beta_0}}{0,6 P_{2\text{ном}} + \sum p_{\beta_0}}$$

$$\eta_p = 1 - \frac{\sum p_{\beta p}}{0,6 P_{2\text{ном}} + \sum p_{\beta p}},$$

можна визначити

$$\sum p_{\beta p} = \sum p_{\beta_0} \frac{\eta_0}{\eta_p} \cdot \frac{(1 - \eta_p)}{(1 - \eta_0)}.$$

Після підстановки даних величина втрат

$$\sum p_{\beta p} = 10,4 \text{ кВт}.$$

Тобто, за згаданих умов сумарні втрати потужності є навіть більшими, ніж у номінальному режимі при нульових відхиленнях. Експлуатація двигуна за таких умов при більш високих рівнях навантажень призведе до його перегрівання.

Таким чином, за рахунок впливів відхилень показників якості електроенергії величина сумарних втрат при рівні навантаження $\beta=0,6$ збільшилась з 6,42 кВт до 10,4 кВт, тобто на 4 кВт. При 8-годинній робочій зміні виникає 32 кВт·год додаткових втрат електроенергії. Це еквівалентно перевитратам 8 грн. за надлишкове споживання не досить якісної електроенергії. За 300 робочих днів на рік це становить:

при однозмінній роботі — 2400 грн.

при двозмінній роботі — 4800 грн.

при тризмінній роботі — 7200 грн.

В сучасних промислових центрах з-за широкого використання енергетичних напівпровідникових пристроїв і нових електрофізикохімічних технологій, особливо електродугових та імпульсних, реальні значення коефіцієнтів k_{nc} та $\mathcal{E}$ нерідко є більшими, інколи виходять далеко за межі, передбачені стандартами. При цьому процеси проходять на фоні підвищеного споживання виробництвами реактивних струмів в нестабільних режимах; з різкими перепадами споживання активної й реактивної потужності, а також відповідними змінами напруги. За таких умов ККД асинхронних двигунів може знизитися на 10% і більше. Це збільшить перевитрати за споживання електроенергії в два–три а то й більше разів та швидкого руйнування двигунів.

З врахуванням викладеного стає зрозумілим, що таких великих перевитрат та перевантаження обладнання можна уникнути принаймні частково, якщо провадити реально доступні заходи по підвищенню якості електричної енергії безпосередньо на місці її споживання. Для коригування різних показників якості електроенергії потрібні відповідно різні заходи, як щодо їх складності, так і вартості додаткового обладнання. Такі заходи мають провадитись кваліфікованими спеціалістами на основі ретельних розрахунків їх ефективності із врахуванням реальних обставин.

Коротко розглянемо проблеми корекції відхилень якості електричної енергії по кожному з цих чотирьох показників. На виробництвах звичайно, не виникає реальних потреб у корекції частоти. Подібні проблеми можуть виникати в крупних електроенергетичних системах загального користування; там є свої методи впливу на ці процеси. До того ж реальні відхилення частоти є відносно незначними і їх вплив на властивості виробничого електромеханічного обладнання є відповідно мало суттєвим.

Значно більшим є вплив відхилень напруги. Зміни напруги дуже суттєво впливають на основні властивості асинхронних двигунів. Зокрема, пропорційно

квадрату напруги змінюється їх електромагнітний момент, а також споживання реактивної потужності. Досить суттєво впливають зміни напруги на втрати активної потужності в двигунах, а також у трансформаторах і кабельних лініях електроживлення; про це докладніше йшлося у попередніх розділах. Для необхідного регулювання напруги слід використовувати всі наявні засоби — регулювання $PBZ 2 \times 2,5\%$, особливо $РПН$ та інші. При наявності відповідних передумов та економічних обґрунтувань доцільно застосовувати й інші засоби регулювання напруги в експлуатаційних, пускових та гальмувальних режимах роботи асинхронних двигунів.

Таким же ефективним заходом, що не потребує значних капітальних вкладень, є симетрування навантажень для зменшення негативних впливів від несиметрії. Здебільшого це вдається вирішити організаційними заходами по перерозподілу активних навантажень у фазах. У випадку, коли симетрування активними навантаженнями у фазах викликає серйозні утруднення, можна створювати штучне симетрування відповідних фаз реактивними ємнісними навантаженнями (конденсаторами). Одночасно такі конденсаторні симетрувальні пристрої виконують і другу корисну функцію щодо компенсації індуктивних струмів та покращення загального $\cos\phi$. Істотно, що й такі заходи потребують відповідних технічних та економічних розрахунків, орієнтованих на досягнення оптимального ефекту.

Найбільш складною і коштовною є корекція несинусоїдальності часових змін форми напруги. Ці прояви викликаються наявністю в загальному складі вищих гармонічних. Найбільш впливовими з них здебільшого є гармонічні непарних порядків, наступні за основною гармонічною першого порядку, тобто 3-я, 5-а, 7-а і т.д. Істотно, що першочергово доцільно подавлювати саме ці гармонічні.

Для цього використовують різні методи — розподіл статорних обмоток асинхронних двигунів та скорочення їх основного кроку, схемні з'єднання обмоток. Останнім часом також все ширше застосовуються фільтри різного призначення: згладжувальні фільтри з використанням індуктивностей (дроселів); в деяких установках — ємнісні; резонансні з використанням індуктивностей і ємностей. Для подавлення певних гармонік застосовують фільтро-компенсувальні установки, настроєні на частоту цієї гармоніки.

У трансформаторах відхилення від стандартних показників якості електричної енергії також викликають негативні прояви, як щодо їх основних, так і стосовно енергозбережних властивостей. Такі прояви зменшують застосуванням відповідних конструкцій енергетичних трансформаторів та з'єднанням їх обмоток. В системах з несиметричним навантаженням

використовують здебільшого трансформатори зі з'єднанням обмоток Δ/Y_0 , де струми нульової послідовності можуть проходити як у первинній, так і у вторинній обмотках; їх потоки у магнітній системі взаємно компенсуються.

5. САМОСТІЙНА РОБОТА СТУДЕНТІВ

Самостійні розробки студентів складаються з двох частин - загальної і спеціальної. Вони виконуються послідовно і кожна з них є завершеним етапом відповідно до конкретних дисциплін. Перша, загальна, частина відповідає дисципліні "Виробничі електромеханічні комплекси". Вона передбачає самостійний пошук і вибір теми електромеханічно-виробничого спрямування; обґрунтування і вибір структури виробничого електромеханічного комплексу (ЕМК) або системи стосовно до певної виробничої технології - механічної або електрофізикохімічної. Для розробленої структури ЕМК розраховують і підбирають необхідне електромеханічне та інше електротехнічне устаткування і апаратуру для всіх відповідних структурних систем: енергетичної, регулювальної, керувальної та захисної.

Подальшим продовженням роботи є спеціальна частина. Вона відповідає наступній дисципліні «Енергозбереження при експлуатації електромеханічних комплексів» та іншим попереднім дисциплінам і передбачає поглиблені розрахунки електромеханічного енергетичного устаткування. Такі розрахунки мають енергозбережне спрямування щодо уточнення потужності і типорозмірів потрібних автономних споживачів - перетворювачів електричної енергії: електричних двигунів для механічних технологій, засобів транспорту та ін., або автономних пристроїв трансформаторного типу для електрофізикохімічних технологій - електродугового або контактного імпульсного електрозварювання; електропічних або інших електротермічних технологій; електрогальванічних, електрохімічних, електроаерозольних та ін. При цьому враховується специфіка режимів, характеристик, умов експлуатації, зниження втрат активної потужності при експлуатації та ін.

Практика застосування таких розробок за останні десятиліття свідчить про їх ефективність і відповідає сучасним умовам широкопрофільної підготовки студентів та подальшої діяльності випускників.

5.1 Вказівки по вибору тем

Тему самостійної роботи щодо виробничого електромеханічного комплексу або системи студент обирає самостійно з врахуванням особистих уподобань, зацікавленості, можливості використання реальної виробничої документації та ін. За минулі роки студенти самостійно вибрали і розробили

сотні робіт, присвячених електромеханічним комплексам і більш складним системам різного виробничого призначення.

Для полегшення орієнтації при виборі теми далі наводиться тематика деяких студентських розробок ЕМК та систем певного виробничого призначення:

- 1) різноманітних металообробних верстатів (токарних, фрезерувальних, свердлильних та ін.);
- 2) тягово-транспортних пристроїв (стрічкових та інших конвеєрів, ліфтів, вантажних кранів різного призначення, підйомників, тельферів, електрокарів та ін.);
- 3) насосних станцій, повітродувок, компресорних установок, виробничих млинів;
- 4) імпульсного зварювального верстата, електротермічного пристрою, гальванічного цеху, електродугового зварювального автомату;
- 5) насосної зрошувальної системи, картонажного виробництва, дільниці магнітно-імпульсної обробки металів; заводу залізобетонних будівельних виробів; дільниці електроремонтного цеху та ін.

При розробці виробничих електромеханічних комплексів і більш складних систем обов'язковою умовою є пошук і використання спеціальної технічної літератури, а при можливості й безпосередньо конкретної виробничої документації з тим, щоб розробка була максимально наближеною до реальних виробничих застосувань.

5.2 Розрахунок електроприводного комплексу

Розрахункові частини курсового проекту повинні бути зорієнтованими на обчислення потрібної потужності електричних двигунів, оцінки джерел живлення, апаратних систем регулювання, керування і захисту ЕМК, визначенню його робочих режимів. Вибір програми розрахунків у спеціальній частині проекту необхідно погодити з керівником курсового проекту.

5.2.1 Технічне завдання на розрахунок ЕМК

1. Попередньо розрахувати потрібну потужність електродвигунів, які входять до складу обладнання ЕМК.
2. Вибрати за довідниками стандартні електродвигуни, які відповідають розрахунковій потужності і вимогам до ЕМК.

3. Скласти навантажувальну діаграму (залежність навантаження від часу) електродвигунів.
4. Перевірити правильність вибору потужності електродвигунів по критерію перевищення температури обмоток.
5. Перевірити сталість роботи електродвигунів у періоди максимального навантаження.
6. Оцінити перевантажувальну спроможність двигунів у період аварійного зниження напруги; визначити граничне припустиме зниження напруги мережі.
7. Розрахувати пускові і гальмівні пристрої електродвигунів, якщо такі передбачені у системі.
8. Розрахувати перехідні процеси у електроприводі при зміні напруги живильної мережі або навантаження.
9. Визначити тривалість пуску та термін зупинки електроприводів.
10. Розрахувати припустиму кількість вмикань електродвигунів.
11. Розрахувати потрібний переріз проводів силових кіл і за довідниками вибрати стандартні кабелі.
12. Вибрати потрібну потужність трансформатора для живлення ЕМК,
13. Розрахувати робочі характеристики силового електрообладнання ЕМК.
14. Розрахувати зниження напруги у мережі при пусках електродвигунів.
15. З довідників вибрати апаратуру захисту і керування ЕМК. Скласти принципові електричні схеми вмикання апаратури.
16. Зробити висновки по роботі, в яких відобразити особистий погляд на роботу ЕМК, використане електрообладнання, особисту думку про доцільність його використання або заміни більш перспективними системами.
17. Результати представити у вигляді пояснювальної записки, виконаної у відповідності з вимогами стандартів, а також графічної частини з відображенням принципової електричної схеми, навантажувальної діаграми, переліком електрообладнання системи, усіма розрахунковими значеннями та характеристиками.

5.2.2 Розрахунок потужності електродвигунів

Електродвигуни вибирають у відповідності з потужністю приводної машини, а форму їх виконання - в залежності від умов оточуючого середовища. Докладно методика розрахунку потрібної потужності електродвигунів викладена у [1].

Розглянемо попередній розрахунок потужності електродвигунів, найбільш характерних для кожного виробничого механізму.

5.2.2.1 Вентилятори

Розрізняють осьові та відцентрові вентилятори. У більшості випадків їх з'єднують жорсткою муфтою безпосередньо з двигунами; проте у окремих установках при тихохідних вентиляторах виникає потреба у проміжних передачах. Потужність двигуна для приводу вентилятора, кВт

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot K_3}{1000 \cdot \eta_v \eta_n}$$

де Q - продуктивність вентилятора, м³/с

$$Q = Q_0 \cdot \frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{273 + t_1}{273}$$

Q_0 - продуктивність вентилятора при $t = 0$ °С та $P_0 = 760$ мм рт.ст.; P_1 - діючий середній барометричний тиск в даній місцевості, мм рт.ст.; t_1 - дійсна середня температура повітря в даній місцевості, °С; H - тиск газу, Па/м²; K_3 - коефіцієнт запасу, для двигунів до 1 кВт $K_3=2$; до 2 кВт $K_3=1,5$; до 5 кВт $K_3=1,25$ і більше 5 кВт $K_3=1,15 \dots 1,2$; η_v - ККД вентилятора, у середньому для осьових вентиляторів $\eta_v=0,5 \dots 0,85$ та для відцентрованих $\eta_v=0,4 \dots 0,7$; ККД передачі $\eta_n=0,92 \dots 0,94$ (для клиноременної), $\eta_n=0,87 \dots 0,9$ (для плоскостасової), $\eta_n=0,98$ (для зубчастої), $\eta_n=1,0$ (при безпосередньому з'єднанні з допомогою муфти).

При визначенні продуктивності вентилятора потрібно враховувати середню температуру та барометричний тиск повітря в даній місцевості. Звичайно продуктивність вентиляторів у каталогах задана при нормальних умовах (700 мм рт.ст. або 100 кПа; 20 °С і відносній вологості 50 %).

5.2.2.2 Насоси

У промислових установках можуть застосовуватися відцентровані та поршневі насоси. Завдяки більшій кількості обертів відцентровані насоси мають менші розміри, а поршневі - більш високий ККД.

Потужність двигуна для приводу насоса, кВт

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot \gamma \cdot K_3}{1000 \cdot n \cdot n_Q \cdot n_n}$$

де Н- диференційний напір стовпа подаваної рідини, м

$$H = h_b + h_n + h_n,$$

h_b та h_n - висота усмоктування та нагнітання відповідно, м; h_n - висота, відповідна втратам напору у системі, або так званий динамічний напір, м

$$h_n = \frac{V^2}{2g} \left(c \cdot \frac{L}{d} + \lambda_2 + \lambda_3 \right);$$

λ_1 - коефіцієнт опору, який залежить від швидкості руху речовини; γ - питома густина перекачуваної рідини, кг/м³; n_Q - ККД насосу (визначається за каталогом); $n_Q=0,6...0,9$; n_n - ККД передачі; K_3 - коефіцієнт запасу, пропонується приймати для двигунів потужністю до 2 кВт - 1,7; 2...5 кВт - 1,5...1,3; 5...50 кВт - 1,15...1,1; 50...100 кВт - 1,08... 1,05; 100 кВт - 1,03.

Значення коефіцієнта λ_1 для води

V,м/с	0,05	0,1	0,2	0,5	0,8	1,0	2,0	3,0	6,0
λ_1	0,057	0,044	0,036	0,032	0,028	0,024	0,021	0,02	0,018

λ_2 - коефіцієнт опору у коліні, який залежить від діаметру труби d і радіусу закруглення r .

Значення коефіцієнта λ_2 для води

d/r	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
λ_2	0,13	0,14	0,16	0,21	0,29	0,44	0,98	1,98

λ_3 - коефіцієнт опору для клапанів 0,49, для засувки 0,063; d - діаметр труби, м; r - радіус закруглення, м; L - довжина трубопроводу, м.

Швидкість рідини при відомому діаметрі трубопроводу, м/с

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}$$

У насосній установці з позитивною висотою всмоктування остання залежить від температури (густини) перекачуваної рідини. Можлива висота усмоктування води від її температури показана на рисунку, де 1 - теоретична крива; 2 - крива, що враховує втрати напору у всмоктувальному трубопроводі; 3 – крива, яка використовується на практиці.

Зі зміною швидкості обертання відцентрованого насосу його параметри можна розрахувати за формулами пропорційності

$$Q/Q' = Q \frac{n'}{n_H};$$

$$H' = H \cdot \left(\frac{n'}{n_H} \right)^2$$

$$p' = p \cdot \left(\frac{n'}{n_H} \right)^3$$

які дозволяють вірно вибрати двигун до відцентрованого насосу, який може працювати зі змінною швидкістю.

У поршневих насосах продуктивність і потужність пропорційні першій ступені зміни швидкості обертання (ходів).

5.2.2.3 Ліфти

Потужність електродвигуна, кВт

$$P = \frac{(G_K + G_H + G_{пр}) \cdot V}{102 \cdot \eta_L},$$

Де G_K , G_H , $G_{пр}$ – відповідно маси кабіни, вантажу і противаги, кг; V – швидкість руху кабіни, м/с; η – ККД підйомного механізму.

Маса противаги

$$G_{пр} = G_K + 0,5 \cdot G_H.$$

5.2.2.4 Транспортери

Потужність електродвигуна стрічкового похилого транспортера, кВт

$$P = \frac{0,736 \cdot K_1 \cdot K_2}{\eta} \left(\frac{A \cdot L_1 \cdot V}{1,5} + \frac{B \cdot L_2 \cdot V}{300} + \frac{Q \cdot H}{270} + C \right),$$

де $K_1 = 1,2; 1,1; 1,06$ і $1,0$ - коефіцієнт, враховуючий додаткові втрати при довжині транспортера відповідно до 15, 30 та 45 і більше 45 м; $K_2 = 1,2 \dots 1,5$ - коефіцієнт, враховуючий збільшення опору при пуску; A і B - коефіцієнти холостого ходу відповідно стрічки і ваги;

C - коефіцієнт на скидача; L_1 і L_2 - відстань між вісями відповідно сусідніх і кінцевих барабанів, м; V - швидкість руху стрічки, м/с; Q - продуктивність транспортера, Т/ч; H - висота підйому вантажа, м; η - ККД передачі (ремінної - 0,87...0,9; клиноремінної - 0,92...0,94; зубчатої - 0,98).

Значення коефіцієнтів A, B, C

Коефіцієнт	Ширина стрічки, мм								
	ДО 400	450	500	600	750	900	1050	1200	1500
A'	0,026	0,02 6	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,1
B	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,1	0,1	0,09
C	1,5	1,5	1,5	1,75	2,5	3,0	4,0	5,0	7,0

* Коефіцієнти дані для підшипників ковзання. Для підшипників кочення їх значення треба зменшити вдвічі. При скидачі, який має форму хвильорізу, коефіцієнт C зменшується вдвічі.

Потужність електродвигуна стрічкового горизонтального транспортера, кВт

$$P = \frac{QQ \cdot f \cdot L}{367 \cdot \eta},$$

Де L - робоча довжина транспортера, м; f - коефіцієнт тертя, у підшипниках ковзання $f=0,1$; кочення 0,01...0,05; η - ККД передачі.

Потужність електродвигуна ковшового елеватора, кВт

$$P = \frac{QQ \cdot H}{367 \cdot \eta},$$

5.2.2.5 Конвейєри

Потужність електродвигуна, кВт

$$P = \frac{F \cdot V}{1000 \cdot \eta},$$

де F — результуюче тягове зусилля конвеєра, Н; V - швидкість руху конвеєра, м/с; η - ККД приводного механізму

5.2.2.6 Компресори

Потужність двигуна для поршневого компресора, кВт

$$P = \frac{K_3 \cdot Q \cdot V}{1000 \cdot \eta_k \cdot \eta_n},$$

Таблиця 4.1

Робота, витрачена на стискання 1 м³ повітря

Кінцевий тиск, Па-10 ⁵	Робота на стис- кання, Дж/м ³	Кінцевий тиск, Па-10 ⁵	Робота на стискання, Дж/м ³
2	71600	7	224000
3	117300	8	242000
4	152200	9	263000
5	179000	10	273000
6	203000	—	—

де $K_3 = 1,1 \dots 1,2$; Q – продуктивність компресора, м³/с; V - робота, яка витрачається на стискання 1 м³ повітря до заданих робочих тисків, Па (таблиця 4.1); η_k - ККД компресора, який дорівнює 0,6...0,8; η_n - ККД передачі.

5.2.2.7 Крани

Потужність електродвигуна підйомного крану при підйомі вантажу, кВт

$$P_n = \frac{(G_n + G_0) \cdot V_n}{1000 \cdot \eta_k \cdot \eta_n},$$

Де G_n і G_0 – відповідно маса піднімаючого вантажу і захватного пристрою, кг;
 V_n – швидкість підйому, м/с; η – ККД підйомного механізму, $\eta=0,6\dots0,8$.

Потужність електродвигуна підйомного крану при спусканні вантажу, кВт

$$P_{n0} = \frac{(G_n + G_0) \cdot V_0 \cdot (2 \cdot \eta_n - 1)}{102 \cdot \eta_r},$$

де V_0 – швидкість спускання вантажу, м/с.

При гальмівному спуску (генераторний режим) $\eta_n > 0,5$; при силовому (рушійний режим) $\eta_n < 0,5$.

Потужність електродвигуна горизонтального переміщення крану, кВт

$$P_{nr} = \frac{K \cdot (G_n + G_m) \cdot (\mu \cdot r + f) \cdot V_r}{102 \cdot \eta_n \cdot R},$$

Таблиця 4.2

Значення коефіцієнта тертя ковзання при спокої і русі

Тертьові тіла	μ		Тертьові тіла	μ	
	спокій	рух		спокій	рух
Чавун по чавуну	—	0,21	Пас по чавунно-шківу		
Чавун по залізу	0,28...0,38	0,18		—	0,3
Залізо по залізу	—	0,44	Сталь по льду	0,027	0,014
Дуб по дубу:			Бронза по бронзі	—	0,2
паралельно волокнам	0,54	0,34	М'яка сталь по бронзі		
				—	0,18
перпендикулярно					

волокнам	0,62	0,48	Чавун по бронзі	—	0,21
----------	------	------	--------------------	---	------

де $K=1,2...1,4$ - коефіцієнт, що враховує тертя реборд об рельси при переносах; G_m - власна маса механізму, кг; μ - коефіцієнт тертя ковзання (таблиця 4.2); r - радіус шийки осі коліс, см; f - коефіцієнт тертя кочення; V_r - швидкість горизонтального переміщення; R - радіус колеса, см; η_r - ККД механізму переміщення, $\eta_r=0,7...0,9$.

Значення коефіцієнтів тертя кочення:

Дерево по дереву 0,05...0,08

Чавун по дереву0,046

Залізо по залізу. ... 0,05

Сталева кулька по сталі 0,0005...0,001

Сталеві колеса по рельсам ...0,05

Гумова шина по шосе 0,24

5.2.2.8 Металообробні верстати

Потужність двигуна для токарних, токарно-гвинторізних, карусельних і стругальних верстатів, кВт

$$P = \frac{F_c \cdot q_c \cdot V_p}{1000 \cdot \eta_c}$$

де F_c - питомий опір різання, Н/м², для сталі $F_c=(2,5...3,5)F_{розр}$ ($F_{розр}$ - опір розриву, Н/м²); для сталі $F_{розр}=(294...1180) \cdot 10^6$ Н/м²; для чавуну $F_c=(4...5,5)F_{розр}$, $F_{розр}=(147...197) \cdot 10^6$ Н/м²; q_c - переріз стружки, м²; V_p - швидкість різання, м/с; η_c - ККД верстата, при повному завантаженні $\eta_c=0,6...0,7$.

5.3 Режими роботи електричних машин

ДСТУ 183-85 класифікує всі можливі номінальні режими роботи електричних машин.

Режим S1 - тривалий номінальний (рисунки 5.1, а). Тривалість його N така, що при сталих потужностях P навантаження і втратах ΔP перевищення

температури Q_{max} усіх частин машини над практично сталою температурою охолоджуючого середовища досягає практично усталених значень.

Режим S2 - короткочасний номінальний (рисунк 5,1, б). Періоди сталого навантаження чергуються із періодами вимкнення машини. При цьому періоди навантаження настільки нетривалі, що перевищення температури усіх частин машини не встигає досягти усталених значень, а періоди пауз настільки тривалі, що всі частини машини встигають охолонути до температури оточуючого середовища.

Встановлена Держстандартом тривалість періодів роботи в даному режимі -10, 30, 60 і 90 хв. Вона вказана у умовному позначенні режиму роботи, наприклад S2 - 30, S3 - 60 хв.

Режим S3 - повторно-короткочасний номінальний (рисунк 5.1, в), характеризується тривалістю вмикання (ТВ), виражений у процентах і рівний відношенню тривалості робочого періоду до тривалості повного циклу

$$TB = \frac{N}{t_{\text{ц}}} \cdot 100$$

Стандартами вважаються ТВ=15; 25; 40 і 60 %. Тривалість циклу встановлена рівною 10 хв. В умовному позначенні вказують тривалість вмикання у процентах, наприклад S3 - 25; S3 - 40 %.

Режим S4 - повторно-короткочасний номінальний з частими пусками (рисунк 5.1, г). У ньому на відміну від режиму S3 кількість циклів складає 30...360 за годину, тривалість пуску D порівняна з тривалістю робочого періоду N. В умовних позначеннях режиму вказується тривалість вмикання у процентах і кількість вмикань за годину, наприклад, S4 - 20 %, 120 вмикань за годину. Це означає, що двигун розрахований на роботу при 120 вмиканнях за годину, тривалість кожного циклу $t_{\text{ц}}=60/120=0,5$ хв., з яких термін пуску D і термін роботи N складає $D+N=25$ %, тобто 7,5 с., а термін паузи R-22,5 с. Через малу тривалість кожного циклу термін пуску машини порівняний з терміном її роботи, тому збільшення втрат у пусковому періоді виявляє безпосередній вплив на нагрівання машини.

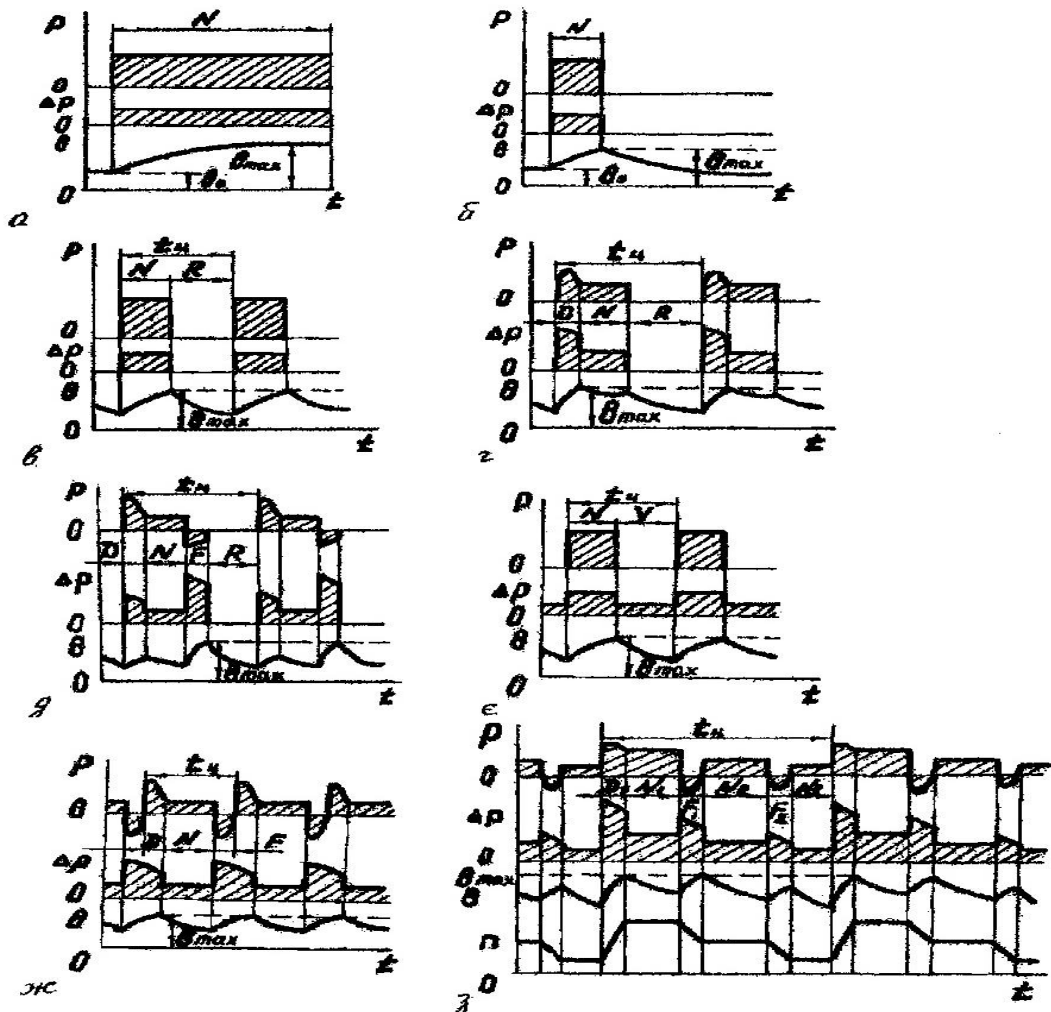
Режим S5 - повторно-короткочасний номінальний з частими пусками і електричним гальмуванням (рисунк 5.1, д). У цьому режимі кожний робочий період закінчується вимиканням машини і її електричним гальмуванням тривалістю F. Тривалість ввімкнення визначається із співвідношення

$TV=(D+N+F)/(t_{ц}100)$. Кількість вмикань за годину прийнято такою, як і в режимі S4. Наприклад, S5-40%, 60 вмикань за годину.

Режим S6 - переміжний номінальний (рисунок 5.1, є). Робочі періоди з незмінним номінальним короткочасним навантаженням чергуються з періодами V холостого ходу. Режим характеризується відносною тривалістю навантаження (TH), яка визначається співвідношенням тривалості робочого періоду N до тривалості $t_{ц}$ повного циклу $TH=N/(t_{ц}100)$. Стандартними вважаються TH , які дорівнюють 15; 25; 40 і 60%. Тривалість одного циклу - 10хв.

Режим S7 - переміжний номінальний із частими реверсами та електричним гальмуванням (рисунок 5.1, ж). У ньому кожний робочий період закінчується електричним гальмуванням, а потім без перерви виконується реверс і починається наступний робочий період. У цьому режимі кількість реверсів – 30...360 за годину. В умовному позначенні вказується кількість

за
годину,
наприкл
ад, S7 -
120
вмикань
за
годину.



номінальний із двома частотами обертання і більше (рисунок 5.1, з). Він

Рисунок 5.1 – Графіки номінальних режимів роботи а-S1, б-S2, в-S3, г-S4, д-S5, є-S6, ж-S7, з-S8

складається із безперервно чергуючих циклів (30...240 за годину), кожний з яких має декілька робочих періодів N_1, N_2, N_3 із різними частотами обертання. Тривалість навантаження на кожній із частот обертання

$$TH_1 = (D_1 + N_1) / (t_y 100); TH_2 = (F_1 + N_2) / (t_y 100); TH_3 = (F_2 + N_3) / (t_y 100)$$

У умовних позначеннях режиму вказується кількість вмикань за годину, навантаження, відповідне кожній із частот обертання, та його відносна тривалість у процентах від загальної тривалості циклу, яка встановлюється по взаємній згоді між замовником і виготовлювачем. Наприклад, у режимі 58- 60 вмикань за годину, 22 кВт, 740 об/хв., 40%, 55 кВт, 1470 об/хв., 60%.

5.4 Перевірка правильності вибору електродвигунів для різних режимів роботи

Якщо двигун працює у неномінальних режимах, його енергетичні показники погіршуються. Для двигуна небезпечне перевантаження, тому що при цьому температура його обмоток може перевищити допустиму, що приведе до його передчасного виходу з ладу. Мати уявлення про температуру обмоток двигуна при відомому характері процесу їх нагрівання дозволяє його навантажувальна діаграма (залежність навантаження від часу), по якій визначаються втрати. Друга умова вибору - забезпечення усталеної роботи двигуна у періоди максимального навантаження або аварійного зниження напруги.

Таким чином, для правильного вибору двигуна потрібно знати залежність навантаження від часу, на основі якої можна розрахувати втрати у його окремих частинах. В результаті теплового розрахунку по методикам, викладеним у підручниках по проектуванню електричних машин, визначають максимальну температуру окремих частин машини. Якщо $t_{max}^0 \leq t_{доп}^0$, то перша умова виконана, і двигун перевіряють по другій умові $M_{нmax} < M_{емmax}$. Якщо

обидві умови виконуються із запасом, треба перевірити можливість вибору двигуна меншої потужності.

На практиці при виборі двигунів перевищення температури обмотокоцінюють непрямим способом - методом середніх втрат, методом еквівалентного моменту, еквівалентної потужності або струму.

5.4.1 Перевірка вибору потужності електродвигуна при тривалому номінальному режимі роботи і сталому навантаженні

Режим S1 (рисунок 5.1, а) притаманний електроприводам вентиляторів, насосів, компресорів, трансформаторів і інших механізмів. Потужність приводного двигуна повинна бути рівною або більшою потужності робочої машини. Оскільки навантаження у даному випадку стале, перевірки на нагрівання та перевантаження не потрібні. Проте, потрібно перевірити достатність пускового моменту, який розвиває двигун, враховуючи підвищений опір тертя у момент пуску виконавчих механізмів.

5.4.2 Перевірка вибору потужності електродвигуна при тривалому режимі роботи і змінному навантаженні

Тривалий режим роботи із змінним навантаженням притаманний металорізальним верстатам, більшості гірничих і сільськогосподарчих машин і механізмів.

Оцінка температури двигуна через середні сумарні втрати називають методом середніх втрат.

Середня потужність двигуна

$$P_{cp} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

де $P_1, P_2, \dots, P_n$ - ступенева потужність на ділянках графіка навантаження, кВт;
 $t_1, t_2, \dots, t_n$ - тривалість ділянок графіка навантаження, с.

Втрати у електродвигуні для кожної ділянки навантаження

$$\Delta p_1 = \frac{p_1}{\eta_1} - p_1; \Delta p = \frac{p_2}{\eta_2} - p_2; \dots$$

або

$$\Delta p = \frac{\Delta p_n p_1}{p_n}; \Delta p_2 = \frac{\Delta p_n p_2}{p_n}; \dots$$

де $\eta_n, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ - ККД при даних навантаженнях p_n

$p_1, p_2, \dots, p_n$, - вибирають по каталогу або по типовій криві $\eta=f(P_2)$ для раніше вибраного двигуна.

Значення номінальних втрат визначається по номінальним даним двигуна

$$\Delta p = \frac{p_n}{\eta_n} - p_n$$

Середні втрати за цикл

$$\Delta p_{\text{ср}} = \frac{\Delta p_1 t_1 + \Delta p_2 t_2 + \dots + \Delta p_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

Якщо при співставленні середніх втрат із номінальними $\Delta p \leq p_n$, то вибраний електродвигун придатний для електропривода даної робочої машини! Розрахунок по методу середніх втрат не враховує максимальної температури при змінному навантаженні. Однак, він достатньо точний і надійний для визначення середньої температури двигуна за цикл. На практиці частіше всього користуються не настільки точними, але зручнішими методами еквівалентних величин.

Метод еквівалентного струму ґрунтується на тому, що струм, який проходить по обмоткам і змінюється по значенню, замінюється еквівалентним струмом $I_{\text{екв}}$, який забезпечив би таке ж нагрівання електродвигуна, як і дійсний.

При змінному навантаженні

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

Де $I_1, I_2, \dots, I_n$ – сила струму на ділянках графіка навантаження, А.

Якщо цикл містить періоди роботи і зупинки, то вираз для $I_{\text{екв}}$ прийме вигляд

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n \beta_n + t_0 \beta_0}}$$

Де t_0 – час зупинки електродвигуна.

Умова нагрівання і охолодження електродвигуна із самовентиляцією залежить від його частоти обертання, тому при пониженій частоті обертання або нерухомому стані тепловіддача електродвигуна погіршується. В зв'язку із цим, якщо у розглядуваний цикл роботи електродвигуна входять пуск, гальмування і зупинка, то у рівнянні для $I_{\text{екв}}$ вводять коефіцієнти, менші одиниці: для електродвигунів постійного струму із самовентиляцією $\beta_1 = 0,75$ – для періодів пуску і гальмування, $\beta_0 = 0,5$ – для періоду зупинки; для АД $\beta_1 = 0,5$; $\beta_0 = 0,25$. Двигун вибраний правильно, якщо $I_{\text{екв}} \leq I_{\text{н}}$.

Потім електродвигун перевіряють на перевантаження

$$I_{\text{н}} \geq \frac{I_{\text{max}}}{\lambda}$$

Де I_{max} – максимальна сила струму по графіку навантаження, А; λ – перевантажувальна спроможність електродвигуна, тобто відношення максимального моменту до номінального (вибирають із каталога).

Якщо остання умова не виконується, то вибирають електродвигун більшої потужності. Для двигунів постійного струму із незалежним і паралельним збудженням $\lambda=2,0\dots2,5$. Перевантажувальна спроможність АД визначається з урахуванням можливого зниження напруги у мережі на 10% :

$$\lambda_{\text{доп}} = 0,81 \left(\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}} \right).$$

Еквівалентне значення струму по приведеним формулам розраховують для прямокутних ділянок графіка навантаження. Для ділянок графіка навантаження, що має вид трапецій, еквівалентна сила струму визначається так

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3}},$$

Де I_1, I_2 – значення струмів, що визначають бокові сторони трапеції.

Метод еквівалентного струму використовується у всіх випадках при визначенні потужності двигуна, крім тих, коли потрібно враховувати зміну постійних втрат, тобто втрат в сталі (при частотному регулюванні або при зміні живильної напруги) і на тертя у двигуні (зміна частоти обертання більш ніж у 2 рази). Метод непридатний і для асинхронного двигуна із глибоким пазом. У такій ситуації треба застосовувати методи, засновані на безпосередньому визначенні втрат.

Метод еквівалентного моменту використовують, якщо відома навантажувальна діаграма електропривода у вигляді залежності Вираз для еквівалентного моменту

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Двигун вибраний правильно при $M_n \geq M_{\text{екв}}$.

Як і у попередньому випадку, електродвигун перевіряють на перевантажувальну спроможність

$$M_n \geq \frac{M_{\text{max}}}{\lambda}.$$

Для графіка навантаження із прямокутними і трапецеїдальними ділянками.

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_1^2 t_i + \sum_{j=1}^{n-m} (M_{j-1}^2 + M_{j-1} M_j + M_j^2) t_j / 3}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{j=1}^{n-m} t_j}},$$

Де: n - кількість усіх ділянок навантажувальної діаграми; m - кількість прямокутних ділянок тривалістю t_i ; $n-m$ - кількість трапецеїдальних ділянок тривалістю t_j .

Метод еквівалентного моменту використовують для асинхронних і синхронних електродвигунів, а також для електродвигунів постійного струму із незалежним збудженням, працюючих із постійним магнітним потоком.

Якщо навантажувальні діаграми представлені графіками потужності, розвиваємої двигуном, його нагрівання можна перевірити методом еквівалентної потужності, який застосовується при постійних потоці й кутовій швидкості, а також при прямій пропорційності між потужністю і струмом. Формула для еквівалентної потужності аналогічна формулі для еквівалентного моменту. Номінальна потужність електродвигуна, яка потрібна за умовами нагрівання $p_n \geq p_{\text{екв}}$.

5.4.3 Перевірка вибору потужності електродвигуна при короткочасному режимі роботи

При виборі двигунів, призначених для роботи у режимі S2, виявляється, що час роботи не співпадає із часом тривалості короткочасної роботи, визначаємої стандартом: 10, 30, 60 і 90 хв. Крім того, навантаження приводу протягом робочого періоду t_p може ступенево змінюватися. У цих випадках

розраховують еквівалентні величини, які приводять до стандартного значення тривалості короткочасної роботи $t_{p.cm}$, найближчого до реального значення t_p . При перевірці вибраної потужності двигуна повинні дотримуватися такі умови:

$$M_{екв} = \sqrt{\sum (M_i^2 t_i) / t_{p.cm}} \leq M_{ном_{t_{p.cm}}},$$

$$P_{екв} = \sqrt{\sum (p_i^2 t_i) / t_{p.cm}} \leq P_{ном_{t_{p.cm}}},$$

Де $M_{ном_{t_{p.cm}}}$, $P_{ном_{t_{p.cm}}}$ – номінальні значення моменту і потужності двигуна, відповідаючі стандартній тривалості короткочасної роботи $t_{p.cm}$ (вибирають із каталогів).

В окремому випадку, коли навантаження протягом робочого періоду не змінюється, то

$$M_{екв} = M \sqrt{\frac{t_p}{t_{p.cm}}};$$

$$P_{екв} = P \sqrt{\frac{t_p}{t_{p.cm}}}.$$

Вибраний двигун потрібно перевірити за умовами пуску і перевантажувальній спроможності:

$$M_n > M_n; M_n \geq \frac{M_{max}}{\lambda}.$$

Для електроприводів, працюючих у режимі S2, недоцільно вибирати двигуни, які призначені для роботи у режимі S1, останні, як правило, мають обмежену перевантажувальну спроможність, в зв'язку з чим недовикористовуються по нагріву. Якщо усе ж приходится вибирати електродвигун тривалого режиму, то він повинен бути навантажений так, щоб за період короткочасної роботи він нагрівався до усталеної температури свого номінального режиму. Перевантаження електродвигуна тривалого режиму при переводі його на короткочасний режим визначається за допомогою коефіцієнту теплового перевантаження

$$K_{мен} = \frac{1}{1 - e^{t_p/T}},$$

де t_p – тривалість короткочасного режиму, хв.; T – стала часу нагрівання, яка приймається для АД малих і середніх потужностей відкритого типу $T=15.. 20$ хв., закритого типу $T=120...300$ хв.

Потім розраховують шукану короткочасну потужність

$$P_{kp} = P_{mp} \sqrt{K_{\text{мег}}},$$

де P_{mp} – потужність електродвигуна тривалого режиму, кВт.

Вибраний електродвигун, якщо він вмикається під навантаженням, треба перевірити на достатність пускового моменту, а також на перевантажувальну спроможність.

5.4.4 Перевірка вибору потужності електродвигуна при повторно-короткочасному режимі роботи

Для електроприводів, працюючих у режимі S3, пропонується вибирати відповідні двигуни. Із цією метою по навантажувальній діаграмі для всього циклу визначають відносну тривалість вмикання

$$ПВ = \sum t_{pi} / (\sum t_{pi} + \sum t_0) 100\%,$$

де t_{pi} – тривалість роботи при i -ому навантаженні усередині робочого циклу, с; $\sum t_0$ – сумарний час зупинки, с.

Потім розраховують приведені до найближчого стандартного значення $ПВ_{ст} = 15, 25, 40, 60 \%$, еквівалентні значення:

$$M_{\text{ЕКПВСТ}} = \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}} \cdot \frac{\sum M_i^2 t_{pi}}{\sum t_{pi}}} \leq M_{\text{НПВСТ}};$$

$$P_{\text{ЕКПВСТ}} = \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}} \cdot \frac{\sum P_i^2 t_{pi}}{\sum t_{pi}}} \leq P_{\text{НПВСТ}};$$

де $M_{\text{НПВСТ}}$, $P_{\text{НПВСТ}}$ – номінальні значення відповідно моменту і потужності двигуна, які відповідають $ПВ_{ст}$.

Вибраний двигун потрібно перевірити на достатність пускового моменту і перевантажувальну спроможність:

$$M_n > M_n; M_n \geq \frac{M_{\text{max}}}{\lambda}$$

При перевірці перегрівання двигуна за методом еквівалентних величин треба внести поправочні коефіцієнти, які враховують погіршення охолодження електродвигунів у періоди пауз пуску β_0 , пуску β_n і гальмування β_r . Як правило, $\beta_n = \beta_r = \beta_0/2$.

Значення поправочного коефіцієнту β_0 синхронних електродвигунів серій А, А02, 4А і АІ:

захищені із частотою обертання 1500 об/хв.

і потужністю 1... 150 кВт 0,5...0,17

закриті:

з обдувом 0,45...0,3

без обдуву 0,93...0,98

Еквівалентна потужність

$$P_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{2(P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3)}{\beta_0(t_1 + t_3 + 2t_0) + 2t_2}}.$$

В деяких випадках при значно більших значеннях ПВ(>70...80%) можливий вибір двигуна, призначений для режиму S1, для якого треба прийняти $PВ_{ст}=100\%$.

При ідентичних циклах із постійним навантаженням всередині робочого періоду еквівалентний момент і потужність можна розраховувати так:

$$M_{\text{еквПВ}_{ст}} = M\sqrt{\text{ПВ}/\text{ПВ}_{ст}};$$

$$P_{\text{еквПВ}_{ст}} = P\sqrt{\text{ПВ}/\text{ПВ}_{ст}}.$$

Якщо електродвигун тривалого режиму переводять на режим повторно-короткочасний із ПВ - 25%, його можна завантажити на подвійну потужність, якщо ПВ - 40% - $1,25P_{н\text{тр}}$; якщо ПВ – 15% - на $2,58P_{н\text{тр}}$. Але використовувати двигуни тривалого режиму у повторно-короткочасному режимі недоцільно, так як двигуни, які призначені для короткочасних режимів, мають більші пускові моменти і перевантажувальну спроможність.

Перегрівання двигунів, працюючих у режимах S4 - S8 перевіряють такими ж способами, що і для режимів S2 - S4 [1 ;3].

5.4.5 Перевірка стійкості роботи електродвигуна у періоди максимального навантаження

Для перевірки стійкості роботи асинхронних електродвигунів потрібно розрахувати статичну механічну характеристику.

Спочатку визначають критичний момент, Нм

$$M_k = \frac{3U_\phi^2 p}{2\omega_0(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2})};$$

Де U_ϕ – фазна напруга мережі, В; ω_0 – синхронна кутова швидкість, рад⁻¹; R_1 – активний опір обмотки статора, Ом; $x_k = x_1 + x'_2$ – індуктивний опір двигуна, Ом; p – кількість пар полюсів.

Критичне ковзання

$$S_k = R'_2 / \sqrt{R_1^2 + X_k^2},$$

де R'_2 – зведений активний опір обмотки ротора, Ом.

За формулою Клоса розраховують механічну характеристику

$$M = \frac{2M_k(1 + aS_k)}{S/S_k + S_k/S + 2aS_k},$$

де $a = R_1/R'_2$.

Пусковий момент $M_{\text{пуск}}$ визначають за формулою Клоса при $S=1$.

При зміні опору резисторів, вмикаємих у коло статора або ротора АД, змінюється частота обертання привода. При цьому модуль жорсткості механічних характеристик зменшується із зниженням частоти обертання, втрати потужності у головному колі збільшуються. Діапазон регулювання різний при зміні опору у колі ротора і статора. Із зміною симетричних додаткових опорів $R'_{2п}$ у колі ротора АД із фазним ротором змінюється критичне ковзання. При цьому критичний момент залишається постійним. Критичне ковзання на реостатній і природній характеристиках пов'язані співвідношенням

$$\frac{S_{к.р}}{S_{к.п}} = \frac{R'_2 + R'_{2п}}{R'_2}.$$

При реостатному регулюванні частоти обертання допустимий навантажувальний момент і коефіцієнти потужності АД залишаються постійними. При збільшенні симетричних додаткових опорів R_{1n} у фазах обмотки статора або (що теж саме) опорів струмопідводних силових кабелів, зменшується критичне ковзання і допустимий навантажувальний момент, скорочується робоча ділянка механічної характеристики.

Допустимий момент АД при такому регулюванні

$$M_{\text{доп}} = M_{\text{н}} \frac{\omega_0 - \omega_{\text{н}}}{\omega_0 - \omega}.$$

Допустимий момент і ковзання двигуна визначається з допомогою додаткового опору R_{1n} у колі статора із використанням залежностей

$$S_{2\text{н}} = \frac{S_{\text{н}}}{1 + a_1 S_{\text{н}}}; \quad a_1 = R_{1n}/R'_2;$$

$$M = M_{\text{н}}(1 - a_1 S_{\text{н}}).$$

При зміні напруги живильної мережі також змінюється частота обертання АД. Для ненасиченого магнітного кола АД критичний момент пропорційний квадрату напруги. При зниженні напруги на затискачах статора зменшується модуль жорсткості механічних характеристик. Механічні характеристики АД при зміні живильної напруги можна розрахувати із співвідношення

$$M(S) = (U_1/U_{\text{мн}})^2 M_{\text{гр}(S)} = U_1^2 M_{\text{гр}(S)},$$

де $M_{\text{гр}(S)}$ - момент на граничній механічній характеристиці при номінальній напрузі живильної мережі, його визначають за формулою Клоса.

Перевантажувальна здатність електродвигунів постійного струму у номінальному режимі, а також у періоди аварійного зниження напруги, оцінюють за методиками викладеними у [1 ;4].

5.5 Розрахунок пускових і гальмівних пристроїв електродвигунів

5.5.1 Електродвигуни постійного струму паралельного і незалежного збудження

Пускові резистори. При пуску двигуна із паралельним збудженням потрібно не допустити надмірно великої сили пускового струму і забезпечити

пусковий Момент, необхідний для розгону двигуна із механізмом. Пускові резистори розраховують двома методами: графічним та аналітичним.

При графічному розрахунку пускового резистора будують пускову діаграму, на якій відкладають пускові моменти або струми: максимальний $M_1(I_1)$ і мінімальний $M_2(I_2)$ у кінці розгону на кожній із ступеней опору, який звичайно називають перемикаючим моментом.

Для двигунів постійного струму

$$M_1 = (2 \dots 2,5) \text{ від } M_n; I_1 = (2 \dots 2,5) \text{ від } I_n;$$

$$M_2 = (1,1 \dots 1,2) \text{ від } M_n; I_2 = (1,1 \dots 1,2) \text{ від } I_n$$

а номінальні моменти і струм двигуна приймають, як правило, рівними відповідно навантажувальному моменту і струму: $M_n = M_c$; $I_n = I_c$ (M_c і I_c - момент і струм навантаження відповідно).

Активний опір обмотки якоря $R_{я}$ вибирають по каталогу або визначають за формулою

$$R_{я} = \frac{U_n}{I_n} 0,5(1 - \eta_n),$$

де η_n - ККД двигуна при номінальному навантаженні.

Частота обертання двигуна у режимі холостого ходу $n_0 = \frac{n_n U_n}{U_n - I_n R_{я}}$ або $n_0 = U / c_e \Phi$. Конструктивна стала двигуна $c_e = (U_n - I_n R_{я}) / \eta_n$. Із точки, яка відповідає номінальному моменту, проводять перпендикуляр $M_n a$, відкладають на ньому у масштабі частоту обертання n_n і отримують точку б (малюнок 5.5). З'єднавши прямою точку б із точкою ідеального холостого ходу n_0 , отримують природну механічну характеристику $n_0 b$. Відрізок аб відповідає опору якоря $R_{я}$. Пряма $1 n_0$ - перша характеристика, яка відповідає повному опору резистора. Із точки 1 починається розгін двигуна. При досягненні двигуном перемикаючого моменту M_2 першу секцію резистора шунтують, що відображено горизонталлю, проведеною через точку 2. При перетині цієї горизонталі із перпендикуляром $M_1 a$ визначають точку 3 другої штучної характеристики.

Кількість пускових ступеней прискорення для двигунів малої потужності (до 10 кВт) дорівнює 1-2, для двигунів середньої потужності (до 50 кВт) - 2-3, для більшої потужності - 3-4.

Кількість ступеней пускового резистора

$$m = \frac{\log\left(\frac{U_H}{R_{\text{я}} I_I}\right)}{\lg \lambda}$$

де I_I – максимальний допустимий пусковий струм електродвигуна;

$\lambda = I_1/I_2$ – відношення максимального пускового струму до перемикаючого.

Щоб отримати m як дорівнює цілому числу, змінюють значення I_I або I_2 .

Оптимальне значення λ можна визначити так: для нормального режиму пуску (при нечастих пусках) задаємося струмом перемикавання $I_2(M_2)$

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{U_H}{R_{\text{я}} I_2}}$$

а для форсованого режиму пуску (для напружено працюючих приводів із великою кількістю вмикань на годину) – максимальним струмом $I_1(M_1)$

$$\lambda = \sqrt{\frac{U_H}{R_{\text{я}} I_I}}$$

Опори окремих ступеней

$$R_1 = \frac{U_H}{I_1}; R_2 = \frac{R_1}{\lambda}; R_3 = \frac{R_2}{\lambda}$$

і т. п.

Опори секцій пускового резистора:

$$r_1 = R_1 - R_2 = \frac{U_H}{I_1} \cdot \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda} \right);$$

$$r_2 = R_2 - R_3 = \frac{U_H}{I_1} \cdot \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda^2} \right) \text{ і т.п.}$$

Гальмівні резистори. Генераторний гальмівний режим із віддачею енергії у мережу спостерігається у тому випадку, якщо на вал двигуна одночасно діють моменти двигуна і механізма. Якщо частота обертання двигуна стає більшою за частоту обертання ідеального холостого ходу n_0 то ЕРС двигуна перевищить напругу мережі, і струм, віддаваний генератором у мережу $I = (E - U)/R_a$, де R_a – повний опір кола $R_a = R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$, $R_{\text{д}}$ – опір додаткового резистора.

Момент, розвиваємий генератором, буде гальмованим. Такий режим спостерігається при вмикненні фанового двигуна на спуск вантажу, коли під впливом моменту навантаження частота обертання електродвигуна може перевищити частоту обертання холостого ходу. Опір додаткового резистора R_d у цьому режимі вводиться до кола якоря для отримання бажаної частоти обертання при заданому моменті на валу машини.

Для отримання частоти гальмування n_z при заданому гальмуючому моменті M_z опір додаткового резистора у колі якоря

$$R_d = \left(\frac{U_n}{I_z} \cdot \frac{n_z - n_o}{n_o} \right) - R_* = \left(\frac{U_n}{M_n} \cdot \frac{M_z}{I_n} \cdot \frac{n_z}{n_o} \right) - R_*.$$

Гальмівний режим противмикання використовується у підйомно-транспортних пристроях, коли електродвигун, ввімкнений на підйом, внаслідок того, що його момент менше моменту вантажа, обертається на спуск. Режим противмикання застосовується також для швидкого гальмування і реверсування електродвигунів, що досягається зміною полярності на затискачах якоря або на обмотці збудження.

Гальмівний момент M_z або струм I_z регулюють введенням додаткового резистора R_d до кола якоря

$$R_d = 2 \frac{U_n}{I_z} - R_* - R_n = \left(2 \frac{U_n}{I_n} \cdot \frac{M_n}{M_z} \right) - R_* - R_n,$$

де R_n - опір пускового резистора.

У режимі динамічного гальмування якорна обмотка електродвигуна відключається від мережі і замикається на гальмівний резистор а обмотка збудження залишається ввімкненою до мережі. Задаючись максимальним гальмівним моментом M_z або струмом I_z які звичайно приймають не більше $(2...3)M_n$ або $(2...3)I_n$, маємо

$$R_d = \left(\frac{n_z}{n_o} \cdot \frac{U_n}{I_z} \right) - R_* = \left(\frac{n_z}{n_o} \cdot \frac{U_n}{I_n} \cdot \frac{M_n}{M_z} \right) - R_*,$$

де n_z - частота обертання двигуна у початкову миттєвість гальмування.

5.5.2. Пускові пристрої АД

Двигуни з фазним ротором. Пусковий реостат у колі ротора АД з фазним ротором дозволяє зменшити початковий пусковий струм і отримати пусковий момент, близький до максимального моменту двигуна.

Ці резистори розраховують двома способами: графічним (малюнок 5.7) і аналітичним. Перший заснований на прямолінійності характеристики і аналогічний розрахунку для двигунів постійного струму паралельного збудження. Для АД приймають $M_1 = (1,1 \dots 1,2) M_n$, а номінальний момент M_n - дорівнює навантажувальному: $M_n = M_c$.

ЕРС між кільцями вимірюють вольтметром при загальмованому роторі або приймають по каталогу. Відрізки ∂g , $g b$, $b \delta$ у масштабі опорів відповідають опорам пускового резистора у порядку їх замикання. Масштаб для опорів, Ом/мм: $m = r_p / ab$.

При аналітичному розрахунку визначають кількість ступеней пускового реостата

$$m = \frac{\lg \left(\frac{10000}{S_n \% M_1 \%} \right)}{\lg \lambda},$$

де M_1 - максимальний пусковий момент двигуна від номінального %; $\lambda = M_1 / M_2$ - відношення максимального пускового моменту до перемикаючого.

При відомій кількості ступеней пускового реостата нормального режиму пуску потрібно задатися моментом M_2

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{10000}{S_n \% M_2 \%}};$$

для форсованого режиму пуску - моментом M_1

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{10000}{S_n \% M_1 \%}}.$$

Опір окремих секцій реостата у кожній фазі:

$$r = r_p (\lambda - 1); \quad r_2 = r_3 \lambda; \quad r_1 = r_2 \lambda.$$

Стандартні опори секцій пускового реостата потрібно визначити за додатковою літературою. Вибрані стандартні опори не повинні відрізнятися від розрахункових більше ніж на $\pm 10\%$.

Двигуни з короткозамкненими роторами. Пряме вмикання двигуна на повну напругу мережі забезпечує максимальний пусковий момент, але пов'язане із значними пусковими струмами, які викликають у мережах великі падіння напруги.

Пуск з допомогою активного опору у колі статора звичайно використовують для двигунів потужністю до 50 кВт, при більшій потужності - з допомогою індуктивного опору.

Опір, вмикаємий у коло статора, визначають заданими умовами зниження струму. При цьому пуску з опором треба, щоб струм складав частину α від пускового струму без опору, тобто $I_{n.p} = \alpha \cdot I_n$, де $I_{n.p}$ - струм при ввімкненому роторі; I_n - струм при відсутності пускового резистора.

Активний або індуктивний опір резистора на фазу

$$r_d = \sqrt{(z_k/\alpha)^2 - x_k^2} - r_k \text{ (для додаткового активного опору);}$$

$$x_d = \sqrt{(z_k/\alpha)^2 - r_k^2} - x_k \text{ (для додаткового індуктивного опору).}$$

Тут $z_k = U_{нф}/I_{нф}$; $r_k = z_k \cos \varphi$; $x_k = z_k \sin \varphi$ - відповідно повний, активний і індуктивний опір фази двигуна при пуску, Ом.

Коефіцієнти потужності при пуску

$$\cos \varphi_n = \cos \varphi_n \left[\frac{M_n}{M_n} \cdot \frac{\eta_n}{(1 - s_n)k_i} + \gamma k_i (1 - \eta_n) \right],$$

де $k_i = I_n/I_n$ - кратність пускового струму (вибирається по каталогу; $\gamma = 1/3$ - відношення втрат міді до номінальних втрат).

5.6 Розрахунок перехідних режимів роботи тягового електродвигуна постійного струму послідовного збудження

Перехідні режими роботи розглядають під час пуску, гальмування, реверсування і швидкої зміни навантажування на валу двигуна. Виникаючі динамічні режими характеризуються змінами ЕРС, кутової швидкості, момента і струму у часі. Розрахунки перехідних режимів використовують при визначенні потужності електродвигунів і апаратури, розробці систем керування і т.п. При цьому визначають залежності $i = f(t)$; $M = f(t)$; $\omega = f(t)$.

Сучасні схеми регулювання частоти обертання тягових електродвигунів постійного струму складаються із тиристорного широтно або фазоімпульсного

перетворювача UZ, зворотного діода VD і дроселя L для згладжування пульсацій. При цьому з допомогою широтно-імпульсного перетворювача напруга $U_{дв}(t)$ змінюється у вигляді прямокутних імпульсів із регульованою величиною $\gamma = t_1/T$, де t_1 - тривалість імпульсів, T- період. При регулюванні значення від 0 до 1 частота обертання двигуна змінюється від n_{min} до n_{max} .

При змінному навантаженні на валу зміна моменту опору у деяких інтервалах часу можна описати залежностями

$$M_c(t) = M_0 \pm k_m t;$$

$$M_c(t) = M_0 \pm \sum_{k=1}^n M_{mk} \sin(\omega_k t + \varphi_k)$$

та іншими функціями.

При регулюванні частоти обертання двигуна за рахунок зміни тривалості імпульсів t_i схема піддається частим комутаціям. Крім змінних режимів джерела і навантаження, змінюється також структура кола. В інтервалі часу t_i коли напруга подається на електродвигун $D(U_{дв} = U_0)$, струм протікає по колі UZ-L-D, а у інтервалі паузи $t_n(U_{дв} = 0)$ він замикається по колу L-D-VD.

Частота обертання $\omega(t)$ і струм $i(t)$ - функції перехідного процесу електродвигуна. При їх розрахунку вихідними даними є: початкові значення $\omega(t_0)$ і $i(t_0)$, які залежать від параметра γ ; параметри схеми R_0, R_1, L_1 - опори зворотного діода, кола двигуна та індуктивність кола двигуна; величина $\gamma = t_i/T$; напруга джерела U_0 , момент інерції системи J , приведений до частоти обертання валу двигуна; паспортні дані електродвигуна; P_H - потужність; U_H - напруга; n_H - частота обертання; M_H - момент; $I_{яH}$ - струм двигуна; $R_{я}, R_B$ - опір відповідно обмоток якоря із будження. У розрахунку використовують співвідношення

$$U_H = E_H + I_{яH}(R_{я} + R_B); E_H = c_e \Phi n_H; M_H = c_m \Phi I_{яH}$$

Перехідний електромагнітний процес у розглянутій схемі описується двома системами нелінійних диференціальних рівнянь: для інтервалів дії імпульсів напруги

$$\begin{cases} T_k \leq t_k \leq t_i + T_k; \\ \frac{di}{dt} = \frac{1}{L_1} [U_0 - i(t)R_1 - e_{об}(t)]; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [M_{дв}(t) - M_c(t)]; \end{cases}$$

для інтервалів пауз

$$\begin{aligned} t_k &\leq T_k \leq t + T(k + 1); \\ \frac{di}{dt} &= -\frac{R_1 + R_0}{L_1} i(t) - \frac{e_{об}(t)}{L_1}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{j} [M_{дв}(t) - M_c(t)]; \end{aligned}$$

де $k=1,2,3,\dots$; $e_{об}(t) = c_e \Phi(t) \omega(t)$ - ЕРС обертання; $M_{дв}(t) = c_m \Phi(t) i(t)$ - момент двигуна.

Нелінійну залежність між магнітним потоком Φ та струмом i для двигуна послідовного збудження можна отримати за допомогою універсальної кривої намагнічування у відносних одиницях [7]

$$\Phi^* = f(i^*),$$

де

$$\Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_H}; \quad i^* = i/I_H.$$

Апроксимуючи цю залежність функцією $\Phi^* = (i^*)^q$ при $q=0,5$, отримаємо похибку менше 5% у робочому діапазоні зміни струму $0,4 \leq i^* \leq 1,4$. із урахуванням прийнятої апроксимації запишемо рівняння ЕРС обертання і моменту двигуна

$$M_{дв}(t) = k_m [i(t)]^{1,5}; \quad e_{об}(t) = k_e \omega(t) [i(t)]^{0,5}$$

де k_e і k_m - постійні коефіцієнти;

Система диференціальних рівнянь для двох режимів

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{1}{L_1} [U_{дв}(t) - k_e \omega i^{0,5} - R(t)i]; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{j} [\{k_m [i(t)]^{1,5} - M_c(t)\}]; \end{aligned}$$

де у інтервалах імпульсів $U_{дв}(t) = 0$; $R(t) = R_1 + R_0$.

При високих частотах комутації і малих пульсаціях струму двигуна для розв'язування розглядаємої системи рівнянь можна прийняти $U_{дв} = U_{ср}$ для всього інтервалу часу, де $U_{ср} = \gamma U_0$ - при широтно-імпульсному регулюванні і $U_{ср} = U_m (1 + \cos \alpha) \pi$ - при фазоімпульсному. Приведену систему

диференціальних рівнянь можна розрахувати методом Рунге-Кутта, яка дозволяє досліджувати перехідні і усталені режими при розгоні і гальмуванні, прямому і ступеневому пусках електродвигуна (змінюючи R_n , стрибкоподібних змінах напруги $U_{дв}$ і навантаження M_c , зміни по заданому закону $U_{дв}(t)$ або $M_c(t)$). Розраховуючи різні варіанти, можна визначити параметри схеми електроприводу, забезпечуючи високий ККД, малі пульсації струму і втрати при різних шпаруватостях регулювання імпульсів напруги.

Використовуючи розрахунки електромеханічних процесів, отримують динамічні механічні характеристики двигуна робочі характеристики двигуна $\omega = f(t)$, зовнішні і регульовальні характеристики імпульсного перетворювача, за допомогою яких можна оцінювати експлуатаційні властивості електропривода, його енергетичні і економічні показники.

5.7 Визначення тривалості пуску і часу зупинки електроприводів

У машинах із відносно великими маховими масами час пуску перевищує 7с. При запуску машин під навантаженням тривалість пуску різко збільшується і може досягти 20...30с. Така тривалість пуску небезпечна для обмоток електродвигунів через надмірний перегрів.

Тривалість пуску визначається з рівняння руху електроприводу при постійних моменту електродвигуна M , моменту сил опору M_c маховому моменту двигуна і навантаженні GD^2 :

$$t_n = \frac{GD^2 n}{375(M - M_c)}$$

Тривалість розгону електроприводу від частоти n_1 до n_2

$$t_n = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375(M - M_c)}$$

Час зупинки електроприводу при незмінному моменті сил опору

$$t_m = \frac{GD^2 n}{375(M_c)}$$

Кількість допустимих вмикань у годину нормального навантаженого двигуна при механічному гальмуванні

$$z = \frac{36(100 - \text{ПВ}_{\text{факт}})}{t_n i_n^2}$$

де $P_{\text{факт}}$ —фактична тривалість вмикання, %; t_n - час пуску електропривода, с;
 i_n - кратність пускового струму.

Для АД із короткозамкненим ротором кількість вмикань у годину можна визначити так

$$z = \frac{36 \cdot 750 S_n p_n k}{n_0^2 G D_{\text{дв}}^2 \left(1 + \frac{G D_{\text{с}}^2}{G D_{\text{дв}}^2} \right)},$$

Де S_n – номінальна потужність двигуна; p_n – його номінальна потужність, кВт; $k=0,3\dots0,4$ – коефіцієнт, який характеризує охолодження двигуна при пуску; n_0 – синхронна частота обертання двигуна, хв^{-1} ; $G D_{\text{дв}}^2, G D_{\text{с}}^2$ – маховий момент відповідно двигуна і навантаження, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

Допустима кількість реверсів у годину у 4 рази менша кількості пусків у годину.

5.8 Визначення перерізу проводів і кабелів

Переріз проводів і кабелів напругою до 1000 В вибирають у залежності від допустимого струмового навантаження, за умовами нагрівання тривалим розрахунковим струмом та у відповідності до вибраного апарату максимального струмового захисту [5].

5.9 Розрахунок робочих характеристик трансформатора

Потужність трансформаторів, які живлять електромеханічний комплекс, вибирають у відповідності до таблиці 5.1.

Далі за каталогами вибирають відповідно потужностям стандартний трансформатор і виписують його параметри.

При розрахунку робочих характеристик трифазного силового трансформатора визначають параметри Тт подібної схеми заміщення; залежність зміни вторинної напруги від навантаження і кута зсуву фаз між векторами напруги і струму, зовнішніх характеристик трансформатора; залежність ККД трансформатора від навантаження; параметри режиму трансформатора.

Таблиця 5.1

Гранична потужність короткозамкнених двигунів, при якій можливий пуск при повній напрузі мережі

№ п/п	Джерело живлення	Гранична потужність короткозамкненого двигуна
1	Трансформатор, питаючий мережу, яка є одночасно силовою і освітлюваною	4% потужності трансформатора при частих пусках 8% потужності трансформатора при рідких пусках
2	Трансформатор, питаючий чисто силову мережу	20% потужності трансформатора при частих пусках 30% потужності трансформатора при рідких пусках
3	Електростанції малої потужності	12% потужності електростанції

Потім розраховують номінальні значення первинного і вторинного струмів трансформатора

$$I_{1H} = S_H / (\sqrt{3} U_{1H}); \quad I_{2H} = S_H / (\sqrt{3} U_{2H});$$

Де S_H – номінальна потужність трансформатора, кВт; U_{1H} і U_{2H} – номінальна напруга відповідно первинної і вторинної обмотки, кВ.

Струм холостого ходу

$$I_0 = I_0^* \cdot I_{1H}$$

Коефіцієнти потужності

$$\cos \varphi_0 = \Delta p_0 / (\sqrt{3} U_{1H} I_0),$$

Де Δp_0 - втрати холостого ходу, Вт; I_0 – - струм холостого ходу, відносна одиниця.

Кут $\delta = 90 - \varphi_0$.

Параметри Т-подібної схеми заміщення трансформатора

$$Z_k = U_{kf}/I_{kf}; R_k = \Delta p_k/(3I_{kf}^2); X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2},$$

Де U_{kf} – фазна напруга короткого замикання, В.

Зміна вторинної напруги трансформатора

$$\Delta U_2 = \beta(U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kr} \sin \varphi_2),$$

де активна і реактивна складові напруги короткого замикання, %:

$$U_{ka} = U_k \cdot \cos \varphi_k; U_{kr} = \sqrt{U_k^2 - U_{ka}^2}.$$

Коефіцієнт потужності короткого замикання

$$\cos \varphi_k = R_k/Z_k.$$

Зовнішню характеристику трансформатора, тобто залежність вторинної напруги від навантаження при незмінній первинній напрузі U_1 , частоті мережі f_1 і незмінному характері навантаження $\cos \varphi_2$, розраховують так, В:

$$U_2 = U_{20} \left(1 - \frac{\Delta U_2}{100} \right).$$

Залежність ККД від навантаження

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_n \cos \varphi_2 + \Delta p_0 + \beta^2 \Delta p_k}.$$

5.10 Розрахунок зниження напруги у мережі при пусках електродвигунів

При вмиканні АД внаслідок збільшення сили пускового струму зменшується напруга у мережі. Це зменшує обертаючий момент і збільшує час пуску електродвигуна. Одночасно зменшується і стійкість раніше підключених до цієї мережі електродвигунів. При пуску електродвигунів від мережі електросистеми зменшення підведеної до нього напруги допускається до 10%. Від мережі малої потужності допускається зниження напруги на його затискачах до 40% від номінальної. При цьому у всіх випадках початковий момент опору приведеної машини не повинен перевищувати 1/3 номінального моменту електродвигуна.

Для розрахунку зниження напруги у мережі при пуску електродвигуна потрібно розрахувати $\cos \varphi_k$ електродвигуна для режиму короткого замикання, використовуючи дані каталогів на двигуни. Для заданого режиму навантаження $\cos \varphi_k$ і значення пускового струму двигуна (із каталогів) потрібно розрахувати зниження напруги на вторинній обмотці трансформатора.

Знаючи силу пускового струму двигуна, опір струмопідвідного кабелю, визначають падіння напруги на кабелі і напругу на затискачах двигуна U_n при пуску.

Для перевірки пускової спроможності електродвигуна його пусковий момент приймається із урахуванням фактичного зниження напруги за час пуску

$$M'_n = (U_n/U_H)^2 k_n M_H \geq M_c$$

Де k_n – кратність пускового моменту при номінальній питаючій напрузі (по каталогу).

5.11 Розрахунок робочих характеристик АД з короткозамкненим ротором

Робочі характеристики електродвигуна – P_1 , I_0 , $\cos \varphi_1$; η ; n ; M_2 ; $s=f(P_2)$. Основні розрахункові співвідношення випливають з рівнянь струмів і напруг, складених для Г-подібної схеми заміщення двигуна.

Розрахунок характеристик виконують при значеннях ковзання у діапазоні $s=(0,2 \div 1,2)s_H$, де номінальне ковзання $S_H = R'_2 I_{1H} / U_{1H}$.

Початкові дані для розрахунку: номінальна потужність P_H і фазна напруга U_{1H} ; опори R_1 , R'_2 ; x_1 , x'_2 ; сумарні втрати $p_{ст} + p_{мех}$; втрати $p_{ст.очн}$; значення намагнічуючого струму I_μ ; кількість пар полюсів r ; додаткові втрати при номінальному навантаженні $p_{доод.н.}$. Розрахункові величини обчислюють за формулами

опір, Ом $x_{12} = U_{1H} / I_\mu - x_1$;

коефіцієнт $c_1 = 1 + x_1 / x_{12}$;

активна і реактивна складові струму холостого ходу, А

$$I_a = (p_{ст.очн} + 3I_\mu^2 R_1) / 3U_{1H}; I_p \approx I_\mu,$$

опір, Ом

$$R = c_1(R_1 + c_1 R'_2 / S); x = c_1(x_1 + c_1 x'_2)Z = \sqrt{R^2 + X^2};$$

приведений струм ротора, $AI_2^H = U_{1H}/Z$;

струм статора, $AI_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$,

де $I_{1a} = I_{o.a} + I_2^H R/Z$; $I_{1p} = I_{o.p} + I_2^H X/Z$;

Потужність, яка споживлюється з мережі, кВт

$$P_1 = 3U_{1H}I_{1a}10^{-3}.$$

Енергетичні втрати у статорі і роторі, кВт

$$P_{E1} = 3I_1^2 R_1 10^{-3}; \quad P_{E2} = 3I_2'^2 R_2' 10^{-3}$$

Де $I_2'^2 = c_1 I_2^H$.

Додаткові втрати при навантаженні, кВт

$$P_{\text{дод}} = P_{\text{дод.н}}(I_1/I_{1H})^2 10^{-3}.$$

Сумарні втрати, кВт

$$\sum p = p_{\text{ст}} + p_{\text{мех}} + p_{E1} + p_{E2} + p_{\text{дод}}.$$

Потужність на валу електродвигуна, кВт

$$P_2 = P_1 - \sum p.$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = 1 - \sum p/P_1 = P_2/P_1.$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_1 = I_{1a}/I_1.$$

Частота обертання ротора, хв.⁻¹

$$n_2 = \frac{60f}{p}(1 - S).$$

Обертаючий момент, Н·м

$$M_2 = 9550 \frac{P_2}{n_2}.$$

5.12 Вибір апаратури регулювання і захисту

Електричні апарати можна класифікувати за призначенням, виконавчими функціями, принципом дії, режимом роботи і родом захисту. За призначенням апарати поділяють на три групи:

Пускові, які служать для пуску і зупинки двигунів. До них відносяться магнітні пускачі, контактори, пакетні і автоматичні вимикачі.

Комутаційні, що здійснюють функції вмикання і вимикання електричних кіл. Це автомати, контактори, рубильники, перемикачі і пакетні вимикачі.

Захисні, які служать для захисту електродвигунів і мережі від коротких замикань, перевантаження і т.п. - автоматичні вимикачі і запобіжники.

Пакетні вимикачі і перемикачі вибирають таким чином, щоб їхній номінальний струм був більшим від пускового струму електродвигуна, тобто $I_{1н} \geq I_n$ контактори і магнітні пускачі - так, щоб номінальний струм головного кола пускача дорівнював або був більшим від тривалого робочого струму електродвигуна: $I_{нп} \geq I_{н,дв}$ а запобіжники - так, щоб їх номінальна напруга $U_{пр}$ була не менше номінальної напруги мережі U_n (самий патрон, його основа).

Для запобіжників, призначених для захисту електроприймачів, які мають невеликі пускові струми (електронагрівачі, прилади, освітлювальні установки), розрахункові струми плавких установок $I_{у.р}$ приймають рівними номінальним струмам цих електроприймачів. Для запобіжників, призначених для захисту АД, розрахункові струми плавких установок

$$I_{у.р} = k_1 I_n / \alpha ,$$

де I_n – номінальний струм двигуна, А; k_1 – кратність пускового струму; α – коефіцієнт, враховуючий умови пуску двигуна.

При нечастих пусках і тривалості не більше 10 с $\alpha = 2,5$ При важких умовах пуску, частих пусках і тривалості пуску більше 10 с $\alpha = 2,0 \dots 1,6$.

Розрахунковий струм плавких установок запобіжників, призначених для захисту лінії електропередачі, від якої живиться одночасно декілька електродвигунів:

$$I_{y.p} = K_0 \sum_{i=1}^{n-1} K_3 I_n + I_{n1} K_{i1} / \alpha ,$$

де $K_0 \sum_{i=1}^{n-1} K_3 I_n$ – сумарний робочий струм одночасно працюючих двигунів за винятком струму двигуна із максимальним пусковим струмом; K_0 - коефіцієнт одночасної роботи двигунів, які живляться від лінії електропередачі; K_3 – коефіцієнт завантаження; I_n – номінальний струм електродвигунів, А; I_{n1} – номінальний струм двигуна, маючого найбільший пусковий струм, А; K_{i1} – кратність пускового струму цього двигуна;

α – коефіцієнт, враховуючий умови пуску двигуна із найбільшим пусковим струмом.

ДОДАТОК

ЗМІСТ РОЗРАХУНКОВО-ПОЯСНЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ РЕФЕРАТ

ВСТУП (загальні тенденції і перспективи розвитку електромеханічних комплексів і приводів по темі курсового проекту)

- 1 Технічні умови
 - 1.1 Технічні вимоги
 - 1.1.1 Загальні вимоги
 - 1.1.2 Основні параметри і технічні характеристики
 - 1.1.3 Конструктивно-технічні вимоги
 - 1.1.4 Вимоги до стійкості, міцності і усталеності при впливі зовнішніх факторів
 - 1.1.5 Вимоги до надійності
 - 1.1.6 Комплектність
 - 1.1.7 Маркування
 - 1.2 Вимоги по стійкості до зовнішніх впливів
 - 1.3 Вимоги по експлуатації і технічному обслуговуванню
 - 1.4 Правила прийому
 - 1.5 Методи випробувань
 - 1.6 Вказівки по техніці безпеки
 - 1.7 Вказівки по експлуатації
- 2 Опис конструкції
 - 2.1 Пошук можливих конструктивних рішень роботи комплексу і можливих варіантів електроприводів
 - 2.2 Опис конструкції електромеханічного комплексу і приводного двигуна
 - 2.3 Опис електричної схеми і режимів роботи електромеханічного комплексу, побудова навантажувальної діаграми обладнання
 - 2.4 Захист від радіоперешкод і дотримання вимог екологічної безпеки
- 3 Розрахунок електромеханічного комплексу (у відповідності з вимогами розділу 4)

Висновки (рекомендації при оптимізації режимів навантаження і потужності електроприводів)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Болюх В. Ф., Шевченко В. В. Електромеханічні системи автоматичного керування : навч. посіб. – Київ : НТУУ «КПІ», 2018. – 312 с.
2. Копилов І. П. Електричні машини : підручник. – Київ : Вища школа, 2017. – 538 с.
3. Кузнєцов В. Г. Енергозбереження в електромеханічних системах : навч. посіб. – Харків : ХНУМГ, 2019. – 356 с.
4. Попович М. Г., Лозинський О. Ю. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : підручник. – Київ : Либідь, 2005. – 680 с.
5. Браславський І. Я. Електропривод: енергоефективність та енергозбереження : навч. посіб. – Київ : Техніка, 2016. – 280 с.
6. Денисенко В. А. Системи автоматизації та керування електромеханічними об'єктами : навч. посіб. – Київ : НУХТ, 2018. – 344 с.
7. ДСТУ ІЕС 60034-30-1:2019 Машини електричні обертові. Класи енергоефективності одношвидкісних трифазних асинхронних двигунів (ІЕ-коди).
8. Коваленко, М. А., Ткачук, І. В., & Перепелиця, О. С. (2024). Підвищення ефективності асинхронних двигунів. Наукові вісті НТУ «ХПІ». DOI:10.20998/2079-3944.2024.1.08 – розробка моделей підвищення коефіцієнту корисної дії та коефіцієнта потужності АД.
9. Чумак, В., Коваленко, М., Тимощук, О., Ігнатюк, Є., & Коваленко, І. (2023). Комплексна оцінка якості ламінованих осердь електричних машин високочастотним індукційно-вібраційним методом. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (10), 26–32. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.2.05>.
10. Чумак, В., Коваленко, М., Коваленко, І., & Ткачук, І. (2023). Експериментальне дослідження універсального високошвидкісного колекторного двигуна змінного струму. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (9), 39–44. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.06>.