

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра електрифікації, автоматизації
виробництва та інженерної екології
Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Кравчук Олександр Миколайович

УДК 620.93

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Підвищення ефективності використання асинхронної машини з
короткозамкненим ротором при переводі в режим генератора**

141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”
(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Палійчук В.К.

к.т.н., доцент

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Кравчук Олександр Миколайович. Підвищення ефективності використання асинхронної машини з короткозамкненим ротором при переводі в режим генератора. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

В магістерській роботі розроблено нову схему заміщення асинхронної машини, виражену у вигляді активних та індуктивних провідностей статора та ротора, отриману шляхом перетворення електричних ланцюгів відомої Γ - подібної схеми заміщення. Нову схему заміщення не слід розглядати як схему, що повністю заміщає відому Γ – подібну схему. Вона доповнює її та дозволяє отримати залежності повної, активної та індуктивних провідностей фази асинхронної машини. Провідності фази слід розглядати у комплексній формі.

Визначені графічні вирази провідностей від ковзання ротора відображають відповідні їм графічні вирази струму та потужності, що дозволяють визначити обмеження та межі регулювання асинхронної машини в режимі генератора. Визначено залежність коефіцієнта потужності асинхронної машини на основі залежностей повного струму фази та її складових. Розроблено новий спосіб підвищення коефіцієнта потужності асинхронного генератора, що дозволяє знизити споживання реактивної потужності приблизно вдвічі. В роботі розроблено новий спосіб підвищення коефіцієнта потужності асинхронного генератора з короткозамкненим ротором при паралельній роботі з мережею.

Ключові слова: асинхронний генератор, коефіцієнт потужності, напруга, струм, фаза

ANNOTATION

Kravchuk Alexander Nikolaevich. Improving the efficiency of using an asynchronous machine with a short-circuited rotor when switching to generator mode. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualification work for a master's degree in the specialty 141 "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

In the master 's thesis a new substitution circuit of an asynchronous machine is developed, expressed in the form of active and inductive conductivities of the stator and rotor, obtained by converting the electrical circuits of the known L - like substitution circuit. The new substitution scheme should not be considered as a scheme that completely replaces the known L-like scheme. It complements it and allows to obtain the dependences of the total, active and inductive conductivities of the phase of the asynchronous machine. Phase conductivities should be considered in a complex form.

Defined graphical expressions of rotor slip conductivities reflect the corresponding graphical expressions of current and power, which allow to determine the limits and limits of regulation of the asynchronous machine in the generator mode. The dependence of the power factor of an asynchronous machine on the basis of the dependences of the total phase current and its components is determined. A new method of increasing the power factor of an asynchronous generator has been developed, which allows to reduce the consumption of reactive power by about half. A new method of increasing the power factor of an asynchronous generator with a short-circuited rotor when working in parallel with the network has been developed.

Keywords: *asynchronous generator, power factor, voltage, current, phase.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ТРИФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ МАЛИХ РІЧОК.....	8
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	13
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	19
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	30

ВСТУП

Актуальність теми. Територія України має значні водні ресурси, придатні для виробництва електроенергії. На даний час нині енергетичний потенціал рік не використовується. По виробництву електроенергії Україна залишається енергодефіцитією і на власних станціях виробництво електроенергії становить трохи більше 80-90 % від потреби. Останнім часом прийнято низку важливих постанов, розроблено концепції розвитку енергетичного комплексу на державному рівні. Є всі причини використання водних ресурсів для виробництва «зеленої» електроенергії.

Враховуючи вище зазначене на кафедрі «Електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології» Поліського національного університету проводяться дослідження асинхронних двигунів, що серійно випускаються, з метою найбільш раціонального їх застосування як генераторів енергетичних установок для використання відновлюваних джерел енергії, саме тому тема магістерської роботи є досить актуальною.

Мета і задачі дослідження. Метою магістерської роботи є підвищення ефективності використання асинхронної машини з короткозамкненим ротором під час переведення в режим генератора.

Задачі дослідження:

- визначити залежності моменту на валу, потужності, активних та індуктивних складових струму фази від навантаження генератора;
- визначити обмеження та межі регулювання навантаження генератора за різними його характеристиками;
- визначити залежність коефіцієнта потужності асинхронного генератора і на цій основі обґрунтувати спосіб його підвищення;
- провести експериментальні дослідження та зробити висновки.;

Об'єкт дослідження: є процес переходу асинхронних двигунів, що серійно випускаються, з короткозамкненим ротором в режим генератора.

Предмет дослідження: є характеристики асинхронного генератора, а саме: залежності моменту, потужності, активних та індуктивних складових струму, коефіцієнта потужності від ковзання ротора, обмеження та межі регулювання генератора.

Методи дослідження. Дослідження виконано з використання загальнонаукових методів пізнання, методів електротехніки, прикладної фізики та електромеханіки. Перевірка адекватності отриманих результатів здійснювалася експериментальними методами із застосуванням сучасних засобів вимірювальної техніки. В експериментальних дослідженнях використовувалися стандартні методики досліджень і обробки результатів.

Перелік публікацій за темою роботи:

2. Палійчук В.К., **Кравчук О.М.**, Шадура В.П., Косоголов І.Б., Сібірук В.А. Вивчення електромагнітних процесів приводу с/г машин зворотно-поступального руху на основі лінійного асинхронного двигуна. Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 39-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 208-210.

2. Палійчук В.К., **Кравчук О.М.**, Шадура В.П., Косоголов І.Б., Сібірук В.А. Тенденція розвитку електроприводів зворотно-поступального руху сільськогосподарського призначення. Збірник тез VII-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 31 березня 2021 року. Житомир : ЖАТК. С. 183-184.

3. Палійчук В.К., **Кравчук О.М.**, Шадура В.П., Косоголов І.Б., Сібірук В.А. Особливості вибору трифазного генератора для енергетичної установки при використанні відновлюваних джерел енергії малих річок. IV Всеукраїнська науково-практична інтернет конференція *«Сучасні технології в енергетиці, електромеханіці, системах управління та машинобудуванні»* (м. Бахмут, 25-26 листопада 2021 р.), Бахмут :ННПП «УПА». С. 53-54

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи можуть бути впровадженні в підприємствах для виробництва .

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 54 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 31 сторінку комп'ютерного тексту, містить 6 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ТРИФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ МАЛИХ РІЧОК

Енергія відновлюваних джерел переважно перетворюється на електричну енергію з допомогою електромашинних генераторів змінного струму. При виробництві, перетворенні та споживанні електроенергії в основному використовується трифазна система змінного струму. У техніці відомі та широко використовуються асинхронні та синхронні машини змінного струму. Вони мають між собою, як загальні властивості так і особливості за конструкцією та принципом дії, можуть працювати, як у режимі двигуна, так і в режимі генератора. З урахуванням своїх особливостей асинхронні та синхронні машини займають своє місце у техніці. Синхронні машини в основному використовуються як генератори на теплових, атомних і гідроелектричних станціях. На теплових і атомних станціях як синхронні генератори застосовуються швидкохідні електричні машини – турбогенератори, з частотою обертання 3000 і 1500 об/хв.

Освоєно серійний випуск турбогенераторів потужністю 500 МВт і 800 МВт.

Практично вся електроенергія, що виробляється на Землі, виробляється синхронними генераторами. Значно рідше синхронні машини використовуються як двигуна для приводу потужних насосів, вентиляторів, повітродувок. Гранична потужність синхронних двигунів досягає кількох сотень мегават.

Номенклатурний ряд всіх синхронних машин, що випускаються: генераторів і двигунів – значно менше номенклатурного ряду серійно випускаються асинхронних двигунів.

Асинхронні двигуни займають своє місце у техніці. Приблизно дві третини всієї електроенергії, що виробляється на електростанціях, перетворюється на механічну за допомогою електричних двигунів. Наймасовішими серед двигунів є асинхронні двигуни, які за своєю конструкцією ротора виконуються двох видів: з короткозамкненим ротором та з фазним ротором.

Асинхронні двигуни загальнопромислового призначення випускаються великими серіями, оновлюються кожні 9-10 років, їх технічні характеристики досить добре опрацьовані. Наприклад, серія 4А і наступні за нею серії включають потужності від 0,06 до 400 кВт при 17 стандартних висотах осі обертання. На основі основної серії випускаються різні модифікації асинхронних двигунів з урахуванням необхідних технічних вимог. Загальна кількість типовиконань асинхронних двигунів, що серійно випускаються, досягає понад 25 тисяч.

Тому асинхронні двигуни дуже доступні для їх використання у тому числі і як генератори. Ця обставина розглядається розробниками як велика перевага асинхронних машин у порівнянні з синхронними при проектуванні установок з використання відновлюваних джерел енергії потужністю до 100 кВт.

Конструктивні та технічні характеристики генераторів оцінюються цілим рядом показників.

Синхронні машини, генератори виконуються здебільшого з трифазною обмоткою на статорі і обмоткою збудження постійного струму на роторі, мають збудник, з'єднаний з валом генератора. Наявність обмотки збудження забезпечує можливість регулювання напруги генератора та реактивної потужності при паралельній роботі з іншими джерелами енергії. Потужність збудження становить лише кілька відсотків від потужності генератора. Активна потужність під час роботи синхронного генератора визначається та залежить від потужності первинного приводного двигуна. Частота напруги, що генерується, залежить від частоти обертання ротора. Синхронні генератори

оцінюються масогабаритними та вартісними показниками. Так, наприклад, синхронний генератор ЕСС5-82-4У2 потужністю 30 кВт, частотою обертання 1500 об/хв має масу 420 кг (або 14,0 кг/кВт) та вартість 69400 грн (або 2313грн/кВт).

Асинхронні двигуни також мають порівняльні показники. За конструкцією ротора асинхронні двигуни випускаються двох видів: з фазним ротором і з короткозамкненим ротором. Вони можуть працювати як генератора.

Асинхронна машина з фазним ротором не має значних переваг перед синхронною машиною, якщо вона використовується в режимі генератора, а обмотка ротора живиться постійним струмом і є обмоткою збудження. Тому таку машину немає необхідності розглядати та визначати якісь її переваги в порівнянні з синхронним генератором.

Асинхронна машина з короткозамкненим ротором має свої переваги та недоліки в порівнянні з синхронною машиною.

Переваги переважно визначаються і пов'язані з конструкцією ротора. Короткозамкнена обмотка ротора дуже проста по конструкції, в ній відсутні ковзні робочі контакти. Це забезпечує асинхронній машині відносно високу надійність, меншу масу і вартість.

Так, наприклад, для порівняння асинхронний двигун АІР180М4 потужністю 30 кВт з синхронною частотою ворогування 1500 об/мии має масу 130 кг (6,3 кг/кВт) та вартість 18636 рублів (або 621,2 руб./кВт).

За питомою масою та вартістю асинхронний двигун значно легше і дешевше за аналогічний за потужністю синхронний генератор. Недоліки переважно пов'язані зі збудженням асинхронного генератора. Слід враховувати, що асинхронна машина при своїй роботі, як в режимі двигуна так і в режимі генератора споживає намагнічуючий струм і намагнічуючу потужність. Так, наприклад, для аналізованого електродвигуна АІР180М4, що має номінальне значення коефіцієнта потужності 0,9, намагнічуюча потужність становить 0,43 від повної потужності асинхронного двигуна.

Цією потужністю асинхронний генератор додатково завантажує паралельно працюючу мережу або виникає необхідність встановлення конденсаторної батареї на розрахункову реактивну потужність.

За наявності конденсаторної батареї маса всієї генераторної установки зростає трохи (не більше 5%), а вартість зростає дещо більше (приблизно на 10-12%).

Система управління асинхронним генератором залежить від режиму роботи з навантаженням: або асинхронний генератор працює паралельно з мережею великої потужності або працює на автономну мережу.

Найпростішу систему управління має асинхронний генератор при паралельній роботі з великою потужністю. При такому режимі відпадає необхідність регулювання напруги і частоти струму генератора. Активна потужність асинхронного генератора регулюється приводним двигуном шляхом підтримки ковзання ротора на заданому рівні з урахуванням завантаження асинхронного генератора в межах номінального струму статора.

Більш складну систему управління має асинхронний генератор під час роботи на автономну мережу. Виникає необхідність у регулюванні та стабілізації напруги та частоти струму залежно від навантаження генератора. Активна потужність працюючого генератора визначається і регулюється приводним двигуном.

Висновки по розділу

Синхронні машини змінного трифазного струму отримали широке застосування як генератори на великих електричних станціях їх поодинокі потужності досягають декількох сотень мегават. В якості двигунів отримали переважне застосування трифазні асинхронні двигуни, що випускаються серійно і мають дуже великий номенклатурний ряд в межах потужності від 0,06 до 400 кВт. Асинхронні двигуни також можуть використовуватися в режимі

генератора. Цій проблемі присвячуються наукові дослідження, особливо під час використання відновлюваних джерел енергії малих річок. Почалося освоєння та випуск гідроагрегатів із застосуванням асинхронних двигунів як генераторів. Однак, залишаються невирішеними багато наукових і практичних питань щодо переведення асинхронного двигуна в режим генератора.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Відповідно до відомих теоретичних положень поставлені такі питання перед експериментальними дослідженнями.

1. Створити лабораторний стенд на дослідження асинхронного двигуна АИМЛ71В4У3 як генератора.
2. Зняти робочі характеристики асинхронного генератора при паралельній роботі з мережею великої потужності за різних напруг мережі.
3. Провести перевірку способу підвищення коефіцієнта потужності асинхронного генератора.

Відповідно до відомих теоретичних досліджень та отриманих результатів у попередньому розділі визначено такі вимоги до лабораторного стенду для експериментальних досліджень:

1. Як асинхронний генератор вибрати серійно випускається асинхронний двигун АИМЛ71В4У3.
2. Привідний двигун для асинхронного генератора повинен забезпечити плавний пуск установки і широкий діапазон регулювання частоти обертання генератора аж до 2000 хв, що забезпечило б збільшення ковзання ротора від нуля до мінус 0,33.
3. Стенд повинен мати пристрій для вимірювання моменту на валу асинхронного генератора та частоти його обертання.
4. Лабораторний стенд повинен бути забезпечений регулятором напруги мережі з метою перевірки робочих характеристик асинхронного генератора за різних напруг.

З урахуванням сформульованих вимог для проведення експериментальних досліджень був створений лабораторний стенд, що містить наступні пристрої та прилади:

а) асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, призначеним для випробування в режимі генератора типу АІМЛ71В4У3, що має наступні номінальні дані:

- потужність 0,75 кВт,
- напруга 220/380 В,
- струм 2,05/3,56 А,
- частота обертання 1395 хв^{-1}
- коефіцієнт корисної дії 74%,
- косинус $\varphi = 0,75$,
- частота мережі 50 Гц.

б) приводний двигун постійного струму типу П21У4, що має номінальні дані:

- потужність 1,0 кВт,
- напруга 220 В,
- струм 6,14 А,
- частота обертання 2200 хв^{-1}
- коефіцієнт корисної дії 74%.

в) для регулювання двигуна постійного струму регульоване джерело постійного струму, що містить трифазний випрямляч і трифазний автотрансформатор типу РНТ-220-12, що має номінальні дані:

- напруга мережі 127/220 В,
- напруга регульована $U_{\text{рег}} = 0 \dots 220 \text{ В}$,
- струм 24/32 А.

г) балансирний пристрій для вимірювання моменту на валу асинхронного генератора, виконане у вигляді кріплення асинхронного двигуна типу АІМЛ71В4У3 на додаткових підшипникових стійках з противагою для створення моменту при відхиленні балансира від нульового стану. Момент на валу асинхронного генератора визначається $M_{\text{ВХ}} = 7,5 \times \sin \alpha$, де 7,5 Н×м – максимальне значення моменту при відхиленні балансиру на кут $\alpha = 90^\circ$. (α –

вимірювана величина відхилення балансірного пристрою для обчислення моменту на валу асинхронного генератора, град.).

д) регульоване джерело трифазної напруги мережі, що містить індукційний регулятор типу РІРС-5, що має номінальні дані:

- напруга на вході 220, 380 В,
- напруга на виході 50...380 В,
- потужність 5 кВт.

е) пристосування для вимірювання частоти обертання асинхронного генератора; електронний тахометр типу ТЕМП-4 з датчиком частоти обертання.

ж) комплект приладів К-505 для вимірювання напруги, струму та потужності асинхронного генератора.

При створенні лабораторного стенду була проведена підготовча робота:

1. Розроблено принципову електричну схему, яка представлена на рис. 2.1.
2. Проведено налаштування установки, пробні випробування та вимірювання її параметрів.

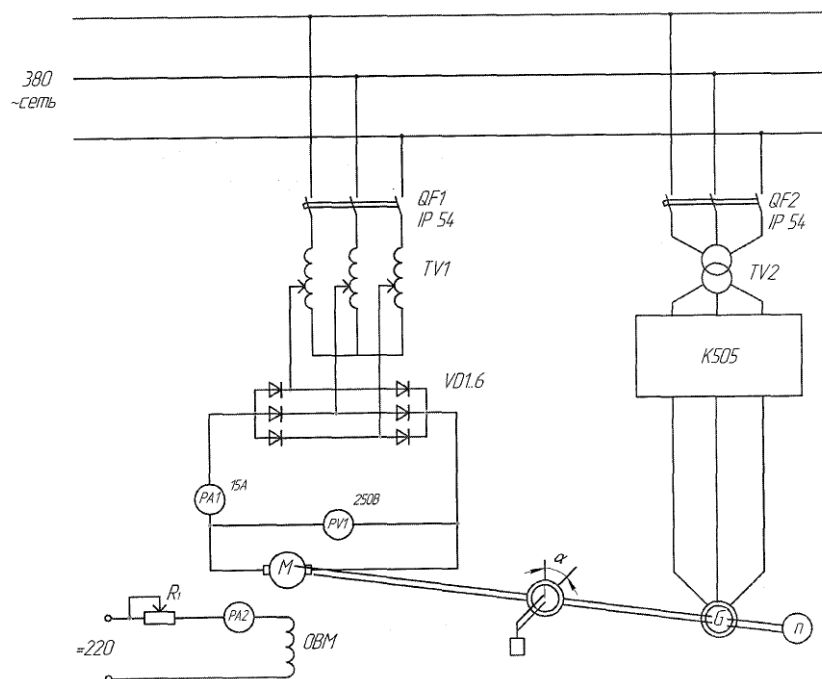


Рис. 2.1. Схема випробування асинхронного генератора

Всі вимірювання та запис даних проводяться в режимі встановленої роботи асинхронного генератора. Напруга, струм та потужність на виході асинхронного генератора вимірюються комплектом приладів К-505 окремо по кожній фазі. Розрахункові величини визначаються за відомими формулами [11].

Для забезпечення необхідної точності та достовірності використовується такі положення:

а) кількість дослідів визначається виходячи з відомих теоретичних досліджень. Наприклад, для визначення прямої лінії досить визначити дві її точки. Для виявлення складніших залежностей застосовується таке правило. Складна крива сприймається як комбінація прямих ліній і найпростіших залежностей. Дослідні дані знімаються поетапним, кроковим методом. Кожен перегин кривої досліджується додатково і описується щонайменше трьома точками.

б) для зменшення випадкових помилок використовується повторність дослідів і обчислюється середнєарифметическое значення параметра. Кількість повторень залежить від стандарту вимірювань. Для отримання надійності $p=0,99$ потрібна чотириразова повторність. Така повторність використовується при знятті асинхронних характеристик з генератори.

в) вимірювання та запис величин при проведенні експерименту проводиться в заздалегідь складені таблиці.

г) обробка дослідів проводиться відомими способами. Частина вимірюваних величин визначається непрямим розрахунком. Формули для розрахунку наводяться нижче. Помилка розрахунків оцінюється з урахуванням дій. Наприклад, при проведенні множення та поділу помилка розрахунків оцінюється як сума відносних помилок співмножників і відповідно діленого та дільника.

д) попередня оцінка та аналіз результатів проводиться у процесі розвитку явища. Результати дослідів представляються як чорнових графіків і одночасно

аналізуються. Особлива увага приділяється окремим результатам, що мають відхилення від плавних кривих розвитку явища.

е) всі експерименти проводяться в лабораторії, де температура підтримується в межах $(18 \dots 24)^\circ \text{C}$, в зимовий час приміщення опалюється, влітку встановлюється природна температура.

Спеціальних вимірів температури обмоток електричних машин не проводилося. Вважається, що температура електричних машин і приладів досягає сталих значень і змінюється в незначних межах, що не робить істотного впливу на вимірювані параметри під час експерименту.

Перед експериментальними дослідженнями було проведено пробні включення, налаштування вимірювань параметрів роботи установки та постановочні випробування.

При постановочних випробуваннях необхідно було визначити механічні втрати, які витрачаються на вентиляцію і тертя в підшипниках при обертанні ротора асинхронного генератора.

На рис. 2.2 представлена енергетична діаграма асинхронної машини, що працює в режимі генератора

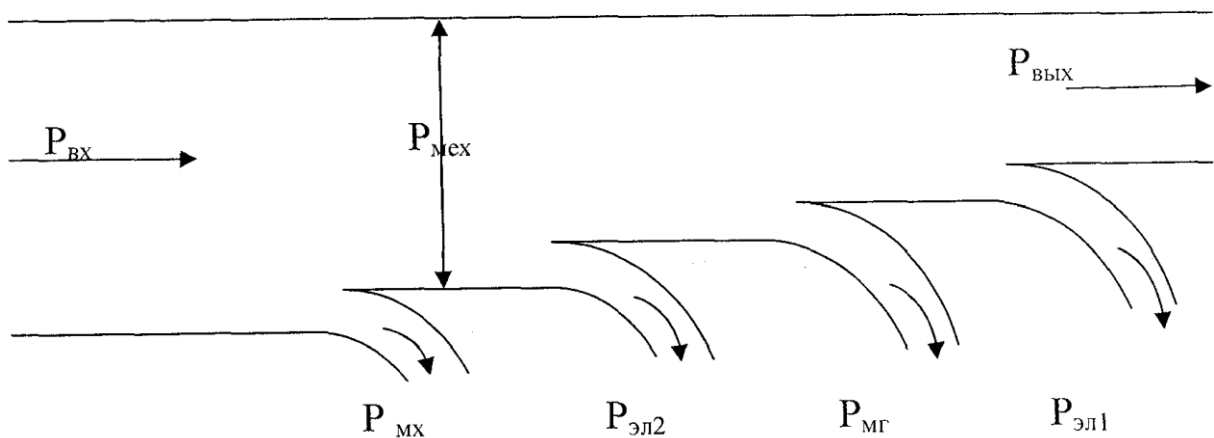


Рис. 2.2. Енергетична діаграма асинхронної машини, що працює в режимі генератора

До валу асинхронного генератора підводиться механічна потужність $P_{\text{мех}} = M_{\text{вх}} \times \Omega$ яка визначається за вимірними величинами моменту та кутової частоти обертання ротора машини. Механічна потужність підведена до валу ротора,

поділяється на дві складові $P_{мех}$ і $P_{мх}$, як це відображено на рис. 2.2. Втрати потужності $P_{мх}$ витрачаються на вентиляцію і тертя в підписниках. Ця потужність не бере участі в перетворенні механічної потужності в електричну.

Для визначення $P_{мх}$ було проведено випробування асинхронного генератора. Вал ротора приводився у обертання приводним двигуном без порушення магнітного поля генератора, частота обертання змінювалася в межах від 1500 до 1700 хв⁻¹. Кут відхилення балансуєчого пристрою α для розрахунку моменту фактично залишався постійним за величиною і становить $\alpha=0,5$ град. Розрахункове значення втрати потужності змінювалося в невеликих межах від 13 Вт – при частоті обертання ротора 1500 хв, до 15 Вт – при частоті обертання 1700 хв. При такій незначній зміні втрати потужності було прийнято для подальших розрахунків середнє значення $P_{мех} = 14,0$ Вт.

Висновки по розділу

В другому розділі магістерської роботи представлена розроблена методика дослідження асинхронного двигуна при переводі в режим генератора.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Відомо, що асинхронний генератор може працювати або паралельно з мережею, або автономну мережу. При роботі асинхронного генератора паралельно з мережею великої потужності значно спрощується система управління генератором, тому що відпадає необхідність регулювання напруги і частоти струму генератора. У такому разі все управління асинхронним генератором зводиться до підтримки частоти обертання ротора (або рівнозначно – до підтримки ковзання ротора) у таких межах, при яких струм фази не виходить за межі номінального значення.

З іншого боку, під час роботи асинхронного генератора на автономну мережу, керування ним значно ускладнюється, оскільки виникає необхідність у додатковому регулюванні та підтримці напруги та частоти струму на певному рівні.

Тому для виконання поставлених завдань перед експериментальними дослідженнями було прийнято простіший спосіб управління генератором - паралельна робота з мережею великої потужності. Електрична принципова схема управління установкою, зображена на рис. 2.1 дозволяє проводити такі експерименти.

Щоразу перед проведенням експерименту необхідно провести пробне включення та налаштування апаратури в наступній послідовності:

1. Перевірити шляхом увімкнення та вимірювання напруги в трифазній мережі.
2. Провести пробне включення до мережі асинхронної машини в режимі двигуна, встановити напрямок обертання ротора.
3. Перевірити шляхом увімкнення наявність напруги в мережі постійного струму для живлення приводного електродвигуна.
4. Провести пробне включення та плавне регулювання частоти обертання приводного двигуна, приєднаного до валу асинхронного генератора, встановити

однаковий напрямок обертання установки при включенні асинхронного двигуна до мережі та двигуна постійного струму.

Після пробних включень було проведено випробування асинхронного генератора при паралельній роботі з трифазною мережею при напрузі мережі, що дорівнює номінальній напрузі генератора $U_{\text{лс}}=U_{\text{лг}}=380$ В або $U_{\text{фс}}=U_{\text{фг}}=220$ В в наступній послідовності:

а) включається приводний двигун мережу при невеликій напрузі, підведений до якоря,

б) підвищується частота обертання асинхронного генератора до синхронної частоти обертання магнітного поля 1500 хв⁻¹,

в) включається асинхронний генератор у мережу при частоті обертання ротора 1500 хв⁻¹.

Цими діями встановлюється вихідний стан генератора (режим ідеального холостого ходу), перевіряються показання приладів. Навантаження та випробування генератора проводиться шляхом плавного збільшення частоти обертання генератора за допомогою приводного двигуна. Запис та обробка результатів випробування здійснюється згідно з описаною вище методикою.

При випробуванні асинхронного генератора відбувається зміна величини і напрямку потужності $P_{\text{вих}}$, які вимірюються комплектом приладів К 505. При частоті обертання ротора 1500 мин⁻¹ асинхронна машина, перебуваючи в режимі ідеального холостого ходу, споживає з мережі індуктивний струм фази, що намагнічує $1,4$ А. Втрати активної потужності ланцюга намагнічування покриваються з допомогою споживання активної потужності з мережі ($-113,3$ Вт). Зі збільшенням частоти обертання ротора і ковзання ротора споживана з мережі активна потужність зменшується і при частоті обертання 1520 хв⁻¹ потужність $P_{\text{вих}}$ набуває нульового значення.

При подальшому збільшенні частоти обертання ротора більше 1520 хв⁻¹ змінюється напрямок активної потужності $P_{\text{вих}}$ і починається зростання активної потужності, що віддається асинхронним генератором в мережу.

Збільшення частоти обертання ротора доводиться до 1610 мин^{-1} при якій величина струму фази досягає номінального значення $I_{\phi}=2,05 \text{ А}$.

Робочі характеристики асинхронного генератора побудовані на рис. 3.1.

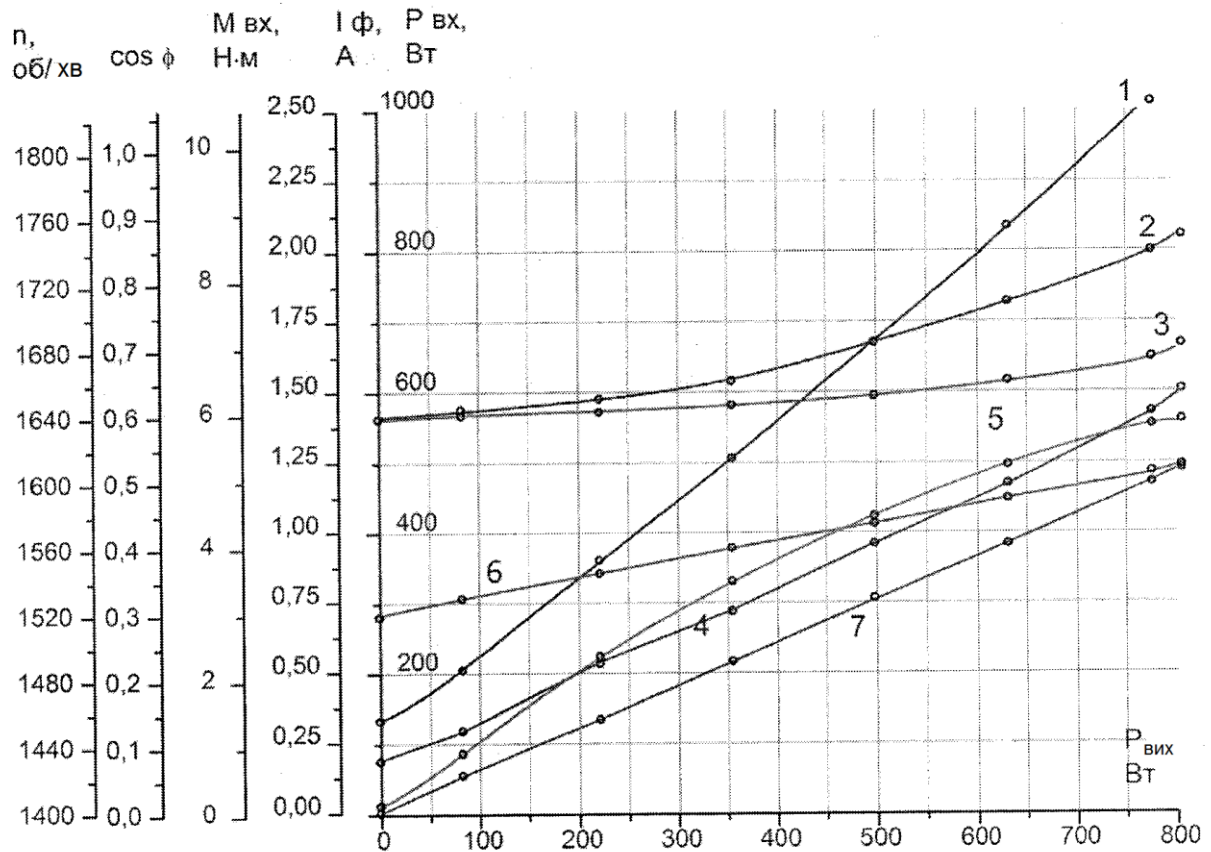


Рис. 3.1. Робочі характеристики асинхронного генератора АИМЛ71В4УЗ при паралельній роботі з мережею при напрузі мережі, яка дорівнює номінальній напрузі генератора $U_{лс} = U_m = 380 \text{ В}$: 1 – потужність на вході асинхронного генератора $P_{вх}$, Вт; 2 – струм фази I , А; 3 – індуктивна складова струму фази $I_{ін}$, А; 4 – момент на вході асинхронного генератора $M_{вх}$, Н·м; 5 – коефіцієнт потужності $\cos \phi$, від. од. 6 – частота обертання ротора n , хв^{-1} ; 7 – активна складова струму фази $I_{ак}$, А.

Експериментальні дослідження генератора підтверджують відомі теоретичні дослідження.

За робочими характеристиками видно, що асинхронний генератор при роботі споживає досить велику індуктивну складову струму. Це позначається на споживанні струму від іншого джерела електричної мережі, наприклад, від

синхронного генератора, паралельно з яким працює випробувальний асинхронний генератор. Можна знизити споживання реактивного струму від синхронного генератора шляхом увімкнення конденсаторів паралельно випробувальному асинхронному генератору. Реактивна потужність конденсаторів може бути визначена за відомою формулою $Q = U_{\text{лс}} \times I_{\text{ін}}$. Для випробуваного асинхронного генератора на базі асинхронного двигуна АИМЛ71В4У3 реактивна потужність визначається $Q = 3 \times 220 \times 1,4 = 924 \text{ ВАр}$, що становить 68,3% від повної потужності, що споживається з мережі.

На основі такого висновку в цій роботі висунуто гіпотезу щодо зниження коефіцієнта потужності асинхронного генератора шляхом зниження напруги мережі щодо номінальної напруги генератора. Зниження напруги мережі дозволяє знизити загальний струм фази та її складові: індуктивну (реактивну) та активну. Далі шляхом підвищення ковзання ротора є можливість збільшити активну складову струму фази. У такий спосіб можна перерозподілити активну та індуктивну складові струму, тим самим підвищити коефіцієнт потужності асинхронного генератора.

Були проведені випробування асинхронного генератора при різних лінійних напругах мережі 360 В, 345 В, 315 В, 245 В і 220 В, знижених щодо номінальної напруги 380 В асинхронного генератора. У всіх дослідах індуктивна складова струму знижувалася пропорційно до зміни напруги мережі. Нижче наведені результати випробувань при лінійному напрузі мережі $U_{\text{лс}} = 220 \text{ В}$. За даними експерименту побудовані робочі характеристики асинхронного генератора при зниженому лінійному напрузі мережі $U_{\text{лс}}=220$ відносно номінального напруги генератора $U_{\text{нр}}= 380 \text{ В}$ (рис. 3.2).

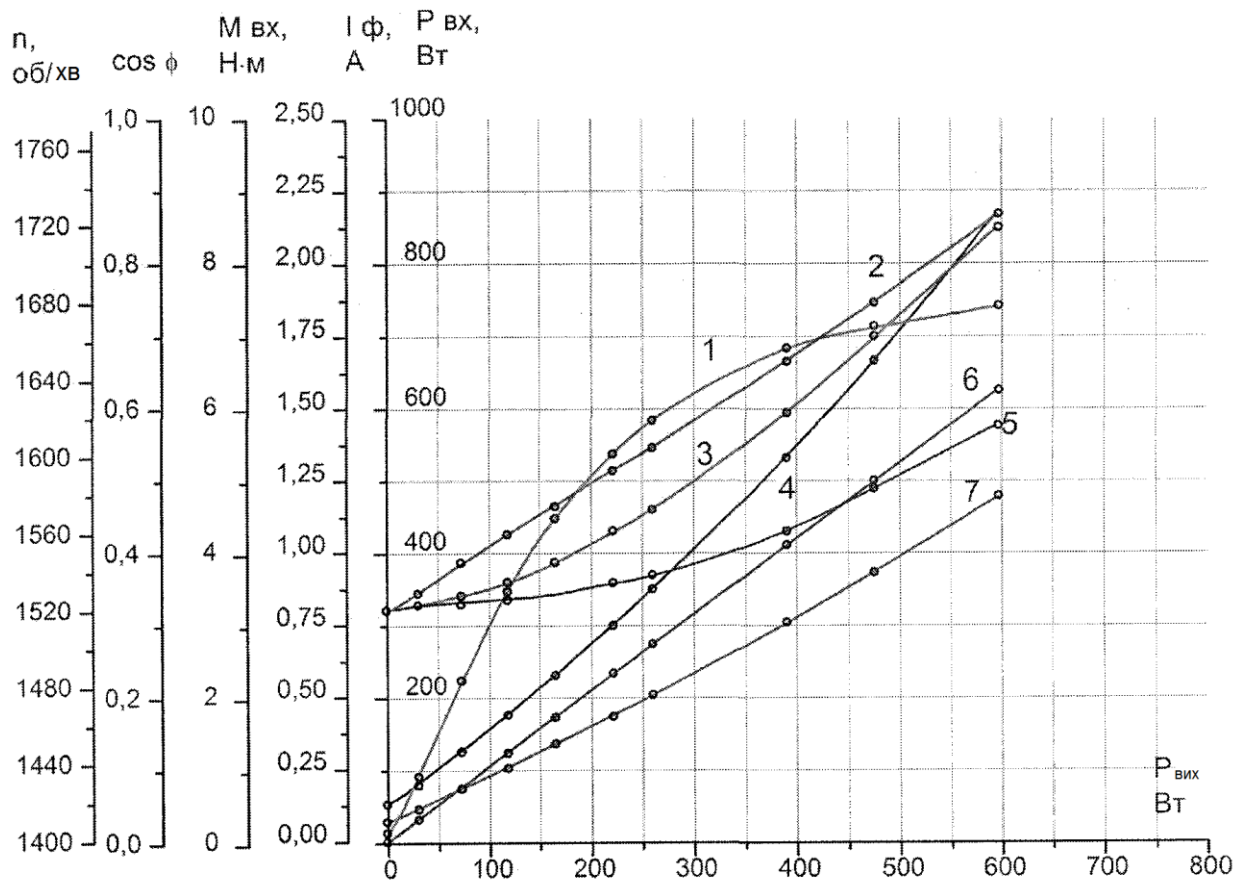


Рис. 3.2. Робочі характеристики асинхронного генератора АИМЛ71В4УЗ при паралельній роботі з мережею та при зниженій напрузі мережі $U_{лс}=220$ В щодо номінальної напруги генератора $U_{лн}=380$ В: 1 – коефіцієнт потужності $\cos\phi$, отн. 2 – частота обертання генератора n , хв^{-1} ; 3 – струм фази I_{ϕ} , А; 4 – потужність на вході асинхронного генератора $P_{вх}$, Вт; 5 – індуктивна складова струму фази $I_{ін}$, А; 6 – активна складова струму фази $I_{ак}$, А; 7 – момент на вході асинхронного генератора $M_{вх}$, $\text{Н}\times\text{м}$.

Зі зниженням напруги мережі в 1,73 рази пропорційно зменшився струм фази та його складові: активна та індуктивна. Також як і при напрузі мережі 380В змінюється потужність $P_{вих}$ за частоти обертання 1500 хв^{-1} . У режимі ідеального холостого ходу ($n=1500 \text{ хв}^{-1}$, $s=0$) показання ватметрів по фазах дають величину (-37,0 Вт) потужності, що споживається з мережі. Зі збільшенням частоти обертання показання ватметрів зменшується, при частоті обертання 1520 хв^{-1} потужність $P_{вих}$ набуває нульового значення.

При подальшому збільшенні частоти обертання понад 1520 хв^{-1} починається збільшення потужності $P_{\text{вих}}$, що віддається асинхронним генератором у мережу.

Проведено навантаження асинхронного генератора шляхом плавного збільшення частоти обертання приводним двигуном до такої частоти 1725 хв^{-1} , при якій струм фази досягнув свого номінального значення.

Як видно на рис 3.2 зменшення напруги мережі з 380В до 220В і з одночасним збільшенням частоти обертання ротора від 1610 хв^{-1} до 1725 хв^{-1} відбувається підвищення коефіцієнта потужності асинхронного генератора від $0,59$ (при $U_c=380$) до $0,74$ (при $U_c=220 \text{ В}$) без збільшення струму понад номінальне значення.

Висновки: при проведенні експерименту отримано збільшення коефіцієнта потужності асинхронного генератора через перерозподіл активної та реактивної складових струму фази всередині кожної фази асинхронного генератора в межах номінального значення струму фази.

Відомо, що будь-яка електрична установка, що містить індуктивні та активні опори, при включенні в мережу змінного струму споживає з мережі струм, що складається з індуктивної та активної складових. Активна складова загального струму бере участь у виконанні корисної роботи електричної установки та у перетворенні електричної потужності на теплову.

Індуктивна складова струму бере участь у створенні магнітних полів електричної установки. Загальний, повний струм навантажує електричну мережу та джерело змінного струму. Частка активної складової струму (і потужності) визначається коефіцієнтом потужності ($\cos\phi$). Що вище $\cos\phi$, то ефективніше використовується струм (і потужність), який споживається з мережі.

Відомий спосіб підвищення коефіцієнта потужності електричної установки, при якому джерело реактивного струму у вигляді конденсатора включається паралельно електричній установці, як це показано на рис 3.3, тим

самим розвантажується електрична мережа, що живить установку, від реактивної складової струму. При рівності провідностей індуктивності і конденсатора $b_1 = b_k$, мережа живлення звільняється від реактивної складової струму.

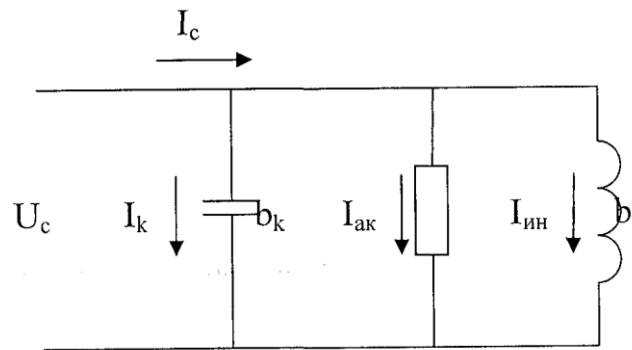


Рис. 3.3. Схема підвищення $\cos\varphi$ електричної установки.

Цей спосіб відомий широко використовується в електротехніці. Такий спосіб може бути застосований і для підвищення коефіцієнта потужності асинхронного генератора, що працює паралельно з мережею. Однак цей спосіб не дозволяє змінити розподіл активної та реактивної складових усередині кожної фази асинхронного генератора.

Нами на основі експериментальних досліджень запропоновано новий спосіб підвищення коефіцієнта потужності асинхронного генератора. На новий спосіб підвищення коефіцієнта потужності.

Винахід відноситься до галузі електротехніки і може бути використаний в асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором, що використовуються в якості генераторів енергетичних установок для перетворення механічної енергії в електричну. Технічний результат – підвищення ефективності роботи асинхронного генератора, що оцінюється за його коефіцієнтом потужності. У способі підвищення коефіцієнта потужності здійснюють перерозподіл реактивної та активної складових струму всередині кожної фази асинхронного генератора з короткозамкнутим ротором при роботі паралельно з мережею. Реактивна складова струму фази зменшується шляхом зменшення лінійної напруги мережі щодо номінальної лінійної напруги генератора на один щабель

з розрахунку ($U_{\text{лін.мережі}} = U_{\text{лін.ген.}}/\sqrt{3}$, тим самим створюється можливість збільшення навантаження генератора та підвищення його коефіцієнта потужності. Активна складова струму фази збільшується в межах номінального значення струму фази при роботі асинхронного генератора шляхом збільшення потужності, що підводиться до валу асинхронного генератора з боку його приводного двигуна електричної установки для перетворення механічної енергії, в електричну. В результаті перерозподілу реактивної та активної складових струму в межах номінального струму фази підвищується коефіцієнт потужності асинхронного генератора.

Новий спосіб підвищення коефіцієнта потужності асинхронного генератора дозволяє підвищити ефективність використання асинхронної машини. Необхідно дати кількісну оцінку на прикладі вище наведених експериментальних даних. При номінальному навантаженні асинхронного генератора, тобто при струмі, що дорівнює номінальному значенню $I_{\phi} = I_{\phi\text{н}} = 2,05 \text{ А}$, видно, що із зменшенням напруги мережі щодо номінальної напруги генератора зменшується частка реактивної складової струму фази від 0,80 до 0,68. Це дозволяє підвищити загальний струм фази до номінального значення, тим самим підвищити частку активної складової струму і коефіцієнт потужності від 0,59 до 0,74 (рис. 3.4).

Зі зниженням загального навантаження фази співвідношення часток активної та реактивної складових струму різко змінюється, у бік поліпшення ефективності нового способу підвищення коефіцієнта потужності. На малюнку 3.4 показано зміну $\cos \phi$ і $\sin \phi$ залежно від відносного завантаження фази генератора $\beta = I_{\phi}/I_{\phi\text{н}}$, за різних напруг мережі 380 В і 220 В.

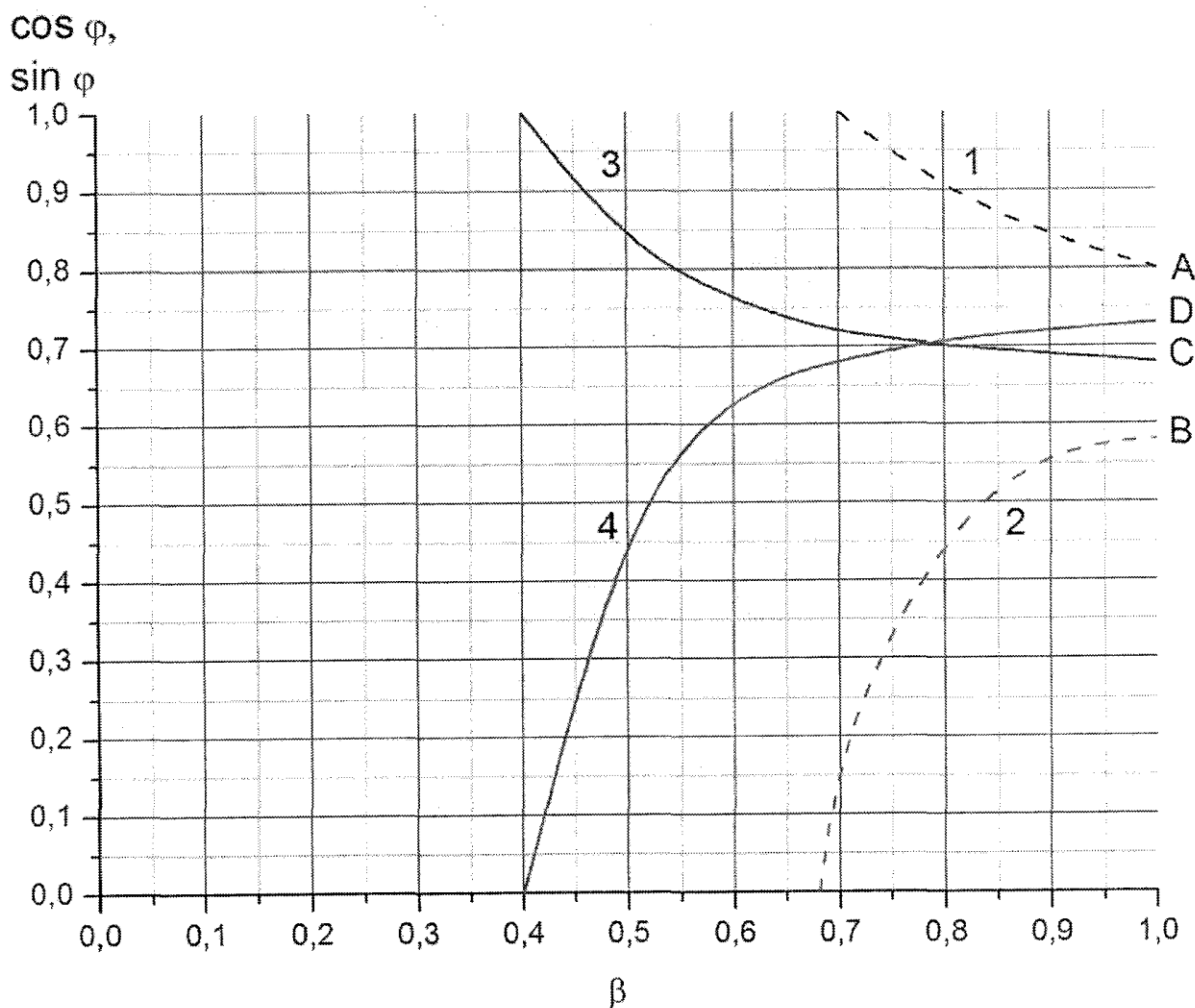


Рис. 3.4. Порівняння відносних часток струму (і потужності) залежно від завантаження фази асинхронного генератора при різних напругах мережі: 1 - частка реактивної складової струму фази $\sin\varphi=f(\beta)$ при напрузі мережі, що дорівнює номінальній напрузі генератора $U_{лс} = U_{лг}=380\text{В}$; 2 - частка активної складової струму фази $\cos\varphi=f(\beta)$ при напрузі $U_{лс} = U_{лг}=380\text{В}$; 3 - частка реактивної складової струму фази $\sin\varphi=f(P)$ при напрузі мережі, меншому напруги генератора, $U_{лс} =220\text{ В} < U_{лг} =380\text{ В}$; 4 - частка активної складової струму фази $\cos\varphi= f(\beta)$ при напрузі мережі $U_{лс} =220\text{ В} < U_{лг} =380\text{ В}$.

Так, наприклад, при зниженні навантаження асинхронного генератора від $\beta=1$ до $\beta=0,7$ при напрузі мережі, що дорівнює номінальній напрузі генератора ($U_{лс} = U_{лг}$) коефіцієнт потужності стає рівним нулю, тобто генератор не видає активну складову струму (і потужності), він завантажений лише реактивною складовою струму. На противагу цьому при напрузі мережі $U_{лс} =220\text{ В} < U_{лг}$

=380 В при навантаженні асинхронного генератора в межах $\beta=0,7\dots 1,0$, коефіцієнт потужності залишається практично на рівні $\cos \varphi \approx 0,7$.

Висновок по розділу

Проведені експериментальні дослідження підтверджують ефективність запропонованого способу підвищення коефіцієнта потужності асинхронного генератора з короткозамкненим ротором при паралельній роботі з мережею.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено нову схему заміщення асинхронної машини, виражену у вигляді активних та індуктивних провідностей статора та ротора, отриману шляхом перетворення електричних ланцюгів відомої Γ - подібної схеми заміщення. Нову схему заміщення не слід розглядати як схему, що повністю заміщає відому Γ – подібну схему. Вона доповнює її та дозволяє отримати залежності повної, активної та індуктивних провідностей фази асинхронної машини. Провідності фази слід розглядати у комплексній формі.

2. Графічні вирази провідностей від ковзання ротора відображають відповідні їм графічні вирази струму та потужності, що дозволяють визначити обмеження та межі регулювання асинхронної машини в режимі генератора.

3. Визначено залежність коефіцієнта потужності асинхронної машини на основі залежностей повного струму фази та її складових.

4. Розроблено новий спосіб підвищення коефіцієнта потужності асинхронного генератора, що дозволяє знизити споживання реактивної потужності приблизно вдвічі.

5. В роботі розроблено новий спосіб підвищення коефіцієнта потужності асинхронного генератора з короткозамкненим ротором при паралельній роботі з мережею.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жулай Є.Л., Зайцев Б.В. та ін. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній. Підручник. Київ:: Вища освіта, 2001. 288 с.
2. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы повышенной частоты. Основы теории и проектирования. Москва : Машиностроение, 1974. 349 с.
3. Алиев И.И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. Москва : ИП Радио Софт, 2004. 128 с.
4. Амбарцумова Т.Т. Макромоделирование асинхронных машин с учетом динамики. Москва : Изд-во МЭИ, 2002. 40 с.
5. Андреева Е.Г., Морозова Н.С., Захаров И.Л. Асинхронные машины. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. 76 с.
6. Баклин В.С., Големгрейн В.В., Игнатович В.М., Попов В.И. Расчет асинхронного короткозамкнутого двигателя с вьспной обмоткой статора. Томск, ТПУ, 2011. 59 с.
7. Боронина Л.Ф., Кокунов Ю.Ф., Солдатенкова Н.А., Чернышев Н.Н. Испытание асинхронных машин. СПб.: Нестор, 2004. 71 с.
8. Бочкарев И.В. Проектирование асинхронных электродвигателей. Кырг. техн. ун-т, Бишкек, 2001. 59 с.
9. Забудский Е.И. Электрические машины. Часть 2. Асинхронные машины. Москва : Мегapolis, 2017. 304 с.
10. Мандыч Н.К. Ремонт электродвигателей. Киев: Тэхника, 1989. 152 с.
11. Зимин Е.Н. Защита асинхронных электродвигателей напряжением до 500 В. Москва : Госэнергоиздат, 1962. 56 с.
12. Кузнецов Б.В., Сацукевич М.Ф. Асинхронные электродвигатели и аппараты управления. Минск : Беларусь, 1982. 222 с.

13. Воробьев В.А., Калинин В.В., Колчинский Ю.Л. и др. Механизация и автоматизация сельскохозяйственного производства. Москва : Колос, 2004. 541 с.

14. Gomis-Bellmunt O., Campanile F. Design Rules for Actuators in Active Mechanical Systems. Springer, 2009. 205 p.

15. Herman S. Electric Motor Control. 9th Edition. Cengage Learning, 2009. 473 p.