

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

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

Левицький Олег Іванович

УДК 620.93

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування низьконапірної мікро-ГЕС для сільських
споживачів

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

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр 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

Савченко Л.Г.

к.і.н., доцент

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Левицький Олег Іванович. Обґрунтування низьконапірної мікро-ГЕС для сільських споживачів. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

В даному дипломному проєкті виконано завдання по створенню ефективних, безбаласних, автоматизованих мікро-ГЕС, які призначені для енергопостачання автономних сільськогосподарських споживачів малої потужності, оснащені системами стабілізації частоти та напруги, незалежного від відсотка споживаного корисного навантаження.

Експериментальним шляхом була зафіксована швидкість обертання ротора асинхронного генератора, приєднаного через ремінну передачу до дворазової турбіни, за відсутності споживаного навантаження частково, і в цілому.

Вироблення електроенергії асинхронних генераторів із самозбудженням з використанням інвектора напруги мережі не тільки зменшить вартість мікро-ГЕС, але й робить більш зручним у використанні споживання електроенергетичних потужностей для автономних однофазних споживачів, тим самим виключаючи можливості несиметричного підключення навантаження споживачам, які не мають класифікацію в електроенергетиці.

Розроблено основи проектування, за даними водотоку та генерованої електроенергії автоматизованої електроустановки для різних характеристик електричного навантаження, низьконапірних мікро-ГЕС.

Ключові слова: асинхронний генератор, гідроелектростанція, напруга, частота, турбіна.

ANNOTATION

Levytskyi Oleh Ivanovych. Justification of a low-pressure micro-hydroelectric power plant for rural consumers. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for the bachelor's degree in the specialty 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – Polissya National University, Zhytomyr, 2023.

In this diploma project, the task of creating efficient, ballastless, automated micro-hydroelectric power plants designed to supply energy to autonomous agricultural consumers of low power, equipped with frequency and voltage stabilisation systems, independent of the percentage of the consumed payload, was completed.

The rotor speed of an asynchronous generator connected to a double turbine via a belt drive was experimentally recorded in the absence of partial and total load consumption.

Electricity generation by self-excited induction generators using a grid voltage investor will not only reduce the cost of micro-hydroelectric power plants, but also make it more convenient to use the consumption of electric power capacities for autonomous single-phase consumers, thereby eliminating the possibility of asymmetric load connection to consumers who do not have a classification in the electric power industry.

The basics of designing an automated electrical installation for various characteristics of the electric load, based on the data of water flow and generated electricity, of low-pressure micro-hydroelectric power plants are developed.

Keywords: induction generator, hydroelectric power plant, voltage, frequency, turbine.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ВИДИ ІСНУЮЧИХ МІКРО-ГЕС В УКРАЇНІ.....	8
РОЗДІЛ 2. АСИНХРОННИЙ ГЕНЕРАТОР - ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	18
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В ГЕНЕРАТОРНОМУ РЕЖИМІ.....	25
ВИСНОВКИ.....	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	40

ВСТУП

Актуальність роботи. Прогрес техніки спричинив укрупнення енергетичних об'єктів та зростання одиничних потужностей агрегатів, через підвищення вартості електроенергії та цін на органічне паливо, а також у зв'язку з програмами освоєння нових режимів, інтерес до малої ГЕС різко зріс.

Малі ГЕС у розвинених країн, зазвичай, оснащуються досконалими агрегатами, обладнаними складними електронними системами регулювання. Відповідно висока вартість таких машин. А енергетика країн, що розвиваються, як і наша Республіка, орієнтується головним чином на максимально дешеві агрегати спрощеної конструкції прості в обслуговуванні та експлуатації.

В умовах нашої країни, де є достатні гідроенергоресурси, розвиток гідроенергетики набуває особливої актуальності.

В останні роки розроблено безліч конструкцій мікро-ГЕС, з яких слід вибрати для нас ефективніші та раціональніші.

Мала гідроенергетика дуже ефективна при енергопостачанні малих селищ особливо у важкодоступних районах, де переважно розвинена скотарство та є значні запаси гідроенергоресурсів, які можуть бути ефективно використані цією галуззю.

Через складність транспортування, важкопрохідність доріг, підвищення цін на пальне багато об'єктів залишаються незабезпеченими теплом та електроенергією у необхідному обсязі.

Все це негативно впливає на розвиток віддалених районів, на туристичні та скотарські об'єкти нашої країни.

Для нашої республіки особливо важливу роль відіграє вартість будівництва мікро-ГЕС. А застосування асинхронних генераторів із самозбудженням (АГС), порівняно із синхронними генераторами, має найменшу вартість.

Застосування відомих способів створення мікро-ГЕС на невеликих напорах і витратах гідропотоків показали, що найбільш перспективними вважаються електростанції з двократними турбінами та асинхронними генераторами з самозбудженням.

А також актуальним питанням є стабілізація значень вихідних параметрів електроенергії, що генерується, які повинні відповідати вимогам державного стандарту щодо якості електроенергії.

Мета роботи – розробка низьконапірної мікро-ГЕС для автономних, сільських споживачів зі стабільними параметрами електроенергії без баластного навантаження, що не залежить від розгону ротора гідрогенератора з однофазним виходом та випробування на дослідних зразках.

Об’єкт дослідження - процес функціонування низьконапірної мікро-ГЕС для автономних, сільських споживачів.

Предмет дослідження - закономірність параметрів електроенергії без баластного навантаження від розгону ротора гідрогенератора з однофазним виходом.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. **Левицький О.І.** Аналіз способів стабілізації параметрів електроенергії, що генерується. Збірник тез IX-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»*. м. Житомир, 5 квітня 2023 року. Житомир : ЖАТФК, . С. 194-197.

2. Савченко Л.Г., **Левицький О.І.** Застосування асинхронних генераторів для мікро-ГЕС та експериментальне дослідження АД у генераторному режимі. *Наукові читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики*. 19 квітня 2023 р. Житомир : Поліський національний університет, 2023. С. 162-165.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи, а саме розроблена низьконапірна мікро-ГЕС для автономних сільських споживачів, можуть бути впровадженні в підприємствах агропромислового комплексу Житомирської області.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 41 сторінка комп'ютерного тексту, містить 4 таблиці і 33 рисунки.

РОЗДІЛ 1

ВИДИ ІСНУЮЧИХ МІКРО-ГЕС В УКРАЇНІ

1.1. Різновиди мікро-ГЕС

Розробка сучасних мікро-ГЕС ґрунтується на застосуванні гідроприводів без регулятора та повинні відповідати всім вимогам до установок вироблення електричної енергії та стабілізації основних параметрів. У багатьох випадках споживачі електричної енергії розташовуються поруч із водотоком із невеликим ухилом. Тому щоб мікро-ГЕС працював ефективно, потрібно будувати греблі чи протяжні водоводи до створення потрібного напору, т.к. гідротурбіни виконується завод - виробником на певний натиск та витрата води.

Розглядаючи літератури можна зробити висновок, що для перетворення енергії потоку води в механічну, щоб обертати вал генератора мікро-ГЕС, застосовуються такі види гідротурбін: пропелерні, поворотно-лопатеві, ковшові, радіально-осьові тощо. [6,7].

Мікро-ГЕС складається з гідротехнічних споруд, турбіни, генератора та системи управління основних параметрів гідрогенератора, комутаційні захисні апарати, баластові навантаження тощо. Рис. 1.1.



Рис. 1.1. Основні установки мікро-ГЕС

Мікро-ГЕС має велику різноманітність конструктивних виконань. Існують різні види, такі як вільнопотокові, дериваційні або руслові типи потужних станцій з греблею, з підвідним напірним трубопроводом або використанням каналу.

Вільнопотокова плаваюча мікро-ГЕС (рис. 1.5.) потужністю до 2000 Вт призначена для роботи в руслі річок, що мають швидкість течії від 0,6 до 0,5 м/с з глибиною не менше 1,3 м і шириною не менше 3 м. Мікро-ГЕС легко транспортується, швидко монтується та демонтується [8].

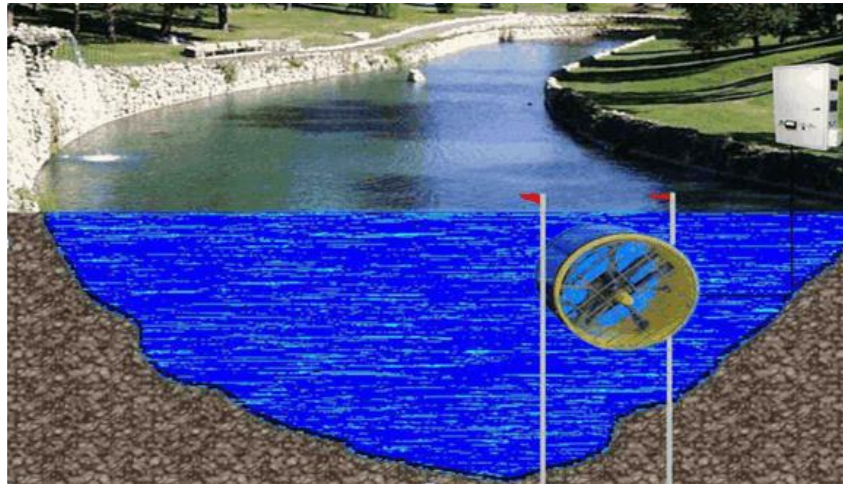


Рис. 1.2. Вільнопотокова мікро-ГЕС

Руслові мікро-ГЕС. Потужність на русловій мікро-ГЕС може бути отримана як за рахунок напору води, створюваного греблею, так і за рахунок швидкості течії води у водотоці ГЕС. Руслові мікро-ГЕС виготовляються потужністю до 20 кВт.

Гідроагрегати з ковшовими гідротурбінами. Ковшові турбіни використовуються на гідроелектричних станціях з великим напором води та випускаються з одним або двома соплами при горизонтальному розташуванні ротора.

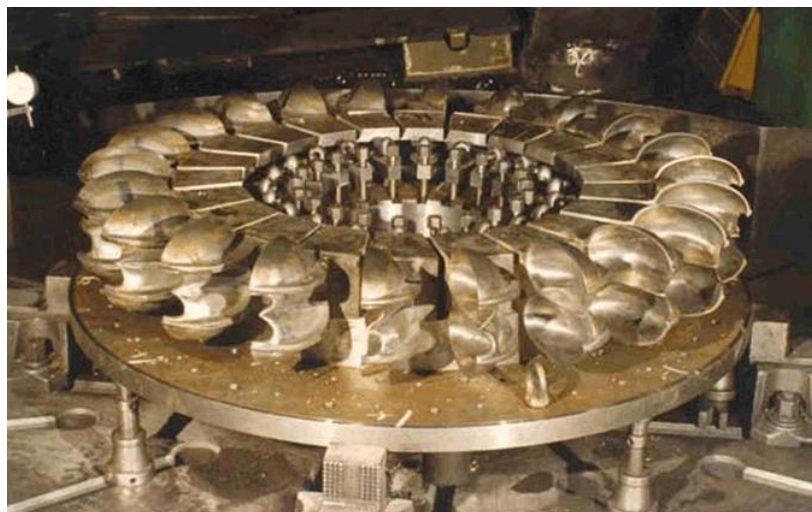


Рис. 1.3. Гідроагрегат із ковшової гідротурбіною

Гідроагрегати з радіально-осьовими турбінами. Вони складаються із металевої спіральної камери (рис. 1.4). Передбачається встановлювати ротор на ГЕС у горизонтальному розташуванні. Також можуть бути гідроагрегати з осьовими турбінами (див. рис. 1.5).



Рис. 1.4. Гідроагрегати з радіально-осьовими турбінами



Рис. 1.5. Гідроагрегати з осьовими турбінами

Гідротурбіна може бути встановлена у відкритій аванкамері у бетонній або металевій спіральній камерах.

1.2. Обґрунтування вибору турбіни

Найнадійнішою, найефективнішою і найпростішою в конструктивному рішенні є дворазова турбіна Банки. Вона має ряд позитивних якостей:

конструктивна та технологічна простота робить турбіну відносно дешевою; високий ККД (понад 80%) знаходиться в широкому діапазоні витрат $[(0,16 - 1,0) Q_{\max}]$ повна автоматизація та простота обслуговування; гарантований термін надійної роботи близько 30-40 років.

Все це дозволяє вважати дворазові турбіни конкурентоспроможними по відношенню до турбін інших типів.

За допомогою ТБ енергія водного потоку перетворюється на механічну енергію обертання передавального механізму, що передається ротору АГС. У свою чергу, асинхронним генератором перетворюється механічна енергія обертання ротора в електричну енергію.

У літературі [9] вказано основне співвідношення, що зв'язує параметр водного потоку і електричної енергії, що генерується. Потужність водного потоку, де встановлений мікро-ГЕС, залежить від робочого напору дворазової турбіни (Н, м) та витрати води (Q, м³/с):

$$N_0 = \rho g H Q \quad (1.1)$$

де g-прискорення вільного падіння, м/с²;

ρ - щільність води, кг/м³;

Потужність водного потоку N_0 більша за потужність дворазової турбіни N_k з урахуванням гідравлічного ККД колеса (η_k). Отже, потужність колеса:

$$N_k = \rho g H Q \eta_k \quad (1.2)$$

де

$$\eta_k = \frac{N_k}{N_0} \quad (1.3)$$

Потужність гідроагрегату $P_{ГА}$ на виведенні генератора менше ніж потужність турбіни, так як у передавальному механізмі виникають втрати та АГС:

$$P_{ГА} = \rho g H Q \eta_k \eta_{пм} \eta_{Г} = \rho g H Q \eta_{Г} \quad (1.4)$$

де η_k , $\eta_{пм}$, $\eta_{Г}$ - ККД передавального механізму, АГС та ТБ.

Для сільськогосподарських споживачів треба розробити ефективний, надійний та простий мікро-ГЕС із дворазовою турбіною Банки. Має

оптимальний геометричний розмір і АГС, з вихідними параметрами відповідають вимогам КЕ та з високим значенням ККД.

При розробці мікро-ГЕС необхідно визначити період роботи автономного джерела, за рік, враховуючи сезонні зміни клімату та робочий натиск, витрати гідроресурсів. Якщо мікро-ГЕС призначена для цілорічного використання та в холодні зимові часи потрібно встановити в утепленому приміщенні.

А також можна спроектувати пересувний варіант мікро-ГЕС до 2-3 кВт для тих, хто веде кочовий образ господарства. Основною вимогою такої гідроустановки є транспортабельність, простота установки та складання.

Складові конструкції не повинні бути більшими за масу 50 кг.

1.3. Аналіз способів стабілізації параметрів генерованої електроенергії

Основними показниками якості виробляється джерелом електроенергії є параметр вихідної напруги, що характеризується номінальною величиною та заданою частотою [2]. Важливою складовою енергоустановки для забезпечення стабільної вихідної напруги та стійкого режиму гідроагрегату є система стабілізації.

Перетворення механічної енергії водяного потоку в електричну енергію можна здійснити за допомогою досить широким набором пристроїв, а також спеціально не призначеними пристроями, що застосовуються мікро-ГЕС. Для отримання найкращої споживчої та експлуатаційної властивостей енергоустановок треба оптимізувати систему перетворення.

Спостерігається тенденція в ГЕС класу «мікро», ускладнення електричної частини установок, яке у багатьох випадках здійснює стабілізаційну функцію електроенергії, що виробляється, з відповідним спрощенням гідротехнічних обладнання [6].

Існує безліч видів стабілізації вихідних параметрів електроенергії, розглянемо такі поширені види:

1. Машинно-вентильна система стабілізації параметрів виробленої електроенергії. Стабілізація параметра електроенергії поділяється на: стабілізацію обертання частоти гідроагрегату та значення частоти змінного струму. Розглянувши, джерела електроживлення з напругою при змінному обертанні гідродвигуна, слід зазначити, що якісна електроенергія, що виробляється, досягається ускладненням конструкції (згодом подорожчання) перетворювальним складовим установки. А також такі гідроагрегати треба розрахувати роботу на великому діапазоні частоти обертання, що визначається характеристикою навантаження джерела електроживлення та гідродвигуна.

Стабілізація з регулюванням значення навантаження мікро-ГЕС спрощує конструкцію вентильного перетворювача та гідроагрегату. Регулюється включенням на вихід генератора баластного навантаження. Під «баластовою» мають на увазі навантаження, а цей спосіб стабілізації передбачає перерозподіл потужності між споживачами, деяким допустимо відключення або зниження значення напруги. На рис. 1.6. показана структурна схема установки з автобаластовим регулюванням параметрів електроенергії, що генерується.

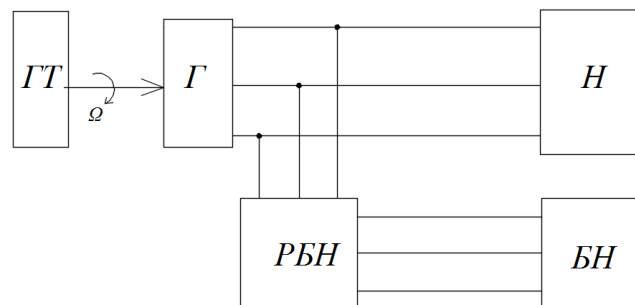


Рис. 1.6. Структура стабілізації

2. Вентильне регулювання напруги електроенергії виробленої мікро-ГЕС з ланцюга якоря. Робочий режим енергоустановок, що регулюються управлінням потужністю навантажень, діляться на дві групи: системи при виникненні гальмівного моменту на допоміжній машині, стабілізується частота

обертання генератора з турбіною. Стабілізація параметра вихідної напруги відбувається за допомогою регулювання величини напруги генераторів [2].

Наприклад, можна використовувати синхронний генератор (СГ), додатково підключаючи на вал з гідроагрегатом, що працює як баластне навантаження, еквівалентна за потужністю з основним генератором, що працює на корисне навантаження. Значення струму збудження синхронного генератора змінюється при зміні корисного навантаження підключенням обмотки збудження додатково включеного генератора регулятора. Сума моментів опору цих генераторів забезпечує постійну частоту обертання енергоустановки (рис. 1.7).

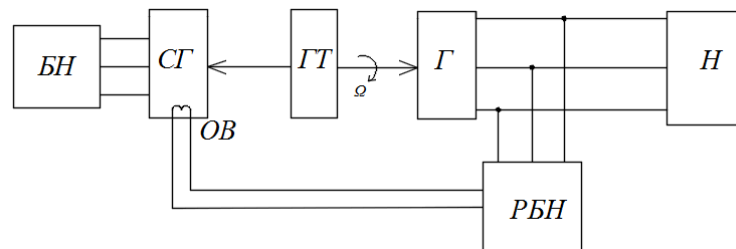


Рис. 1.7. Схема структури автобаласного виду мікро-ГЕС з двома генераторами

Несиметрію навантаження генератора можна компенсувати шляхом регулювання навантаження мікро-ГЕС. Значення струмів навантаження по фазах I_A , I_B , I_C , вимірюємо за допомогою регулятора струму PT_A , PT_B , PT_C і, на відміну від номінальних змінюємо баластові струми I_{BA} , I_{BB} , I_{BC} так, щоб фазні струми генератора були постійними (рис. 1.8).

3. Автобаластні системи з керуванням фазної потужності. Такі системи станції реагують величину струму корисного навантаження на рис. 1.8. показано схему принцип роботи регулятора навантаження баластом в мікро-ГЕС. Навантаженню R_n надходить генераторна напруга U_2 , проходячи первинними обмотками трансреакторів T_{p-p} . Баластові навантаження за допомогою силового вентиляного перетворювача, складовими якого є тиристри T_1 , T_2 , T_3 та діоди V_1 , V_2 , V_3 , підключаються до зірки.

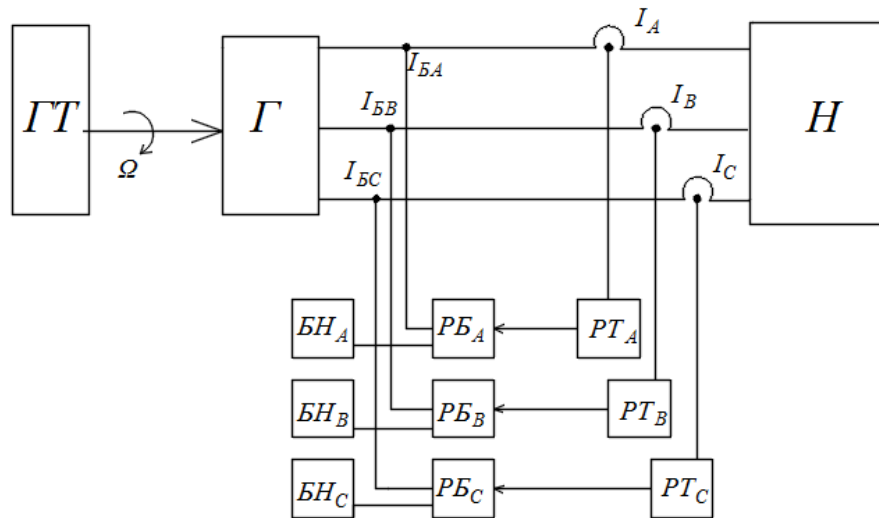


Рис. 1.8. Схема структури мікро-ГЕС з управлінням струму навантаження

Також можна підключити баластне навантаження до перетворювача з випрямленою напругою. Випрямлячі V_4-V_9 отримують живлення від трансреакторів T_{p-p} та керують кути включених тиристорів T_1-T_3 . До керуючого резистори R_y випрямляється і додається напруга на виході трансреакторів, що відповідає струмам навантаження I_n . Якщо значення лінійної напруги більше, ніж напруга управління R_y , що має закриває полярність діодів V_{10}, V_{11}, V_{12} , відкриваються з тиристорами T_1, T_2, T_3 . Якщо $I_n=0$ і $U_n=0$ тоді тиристори T_1, T_2, T_3 знаходяться у відкритому положенні, що забезпечують необхідну потужність баластових навантажень R_6 або R'_6 , у зворотному випадку тиристори T_1, T_2, T_3 будуть у закритому положенні і баласт відключиться. При різних значеннях струму I_n здійснюється баластне регулювання по фазах, в результаті формування кутів тиристор, порівнюючи лінійну напругу резистора з керуючої напруги R_y [1,2].

4. Автобаластні системи з дискретним регулюванням потужності. Основні параметри такі як частота, струм, напруга регулюються баластом. При зміні корисного навантаження станції, а також тиску води, необхідно частотно-регульований автобаласт, що регулює частоту обертання гідроагрегату. Значення вихідної напруги рекомендується стабілізувати ланцюгом збудження генератора.

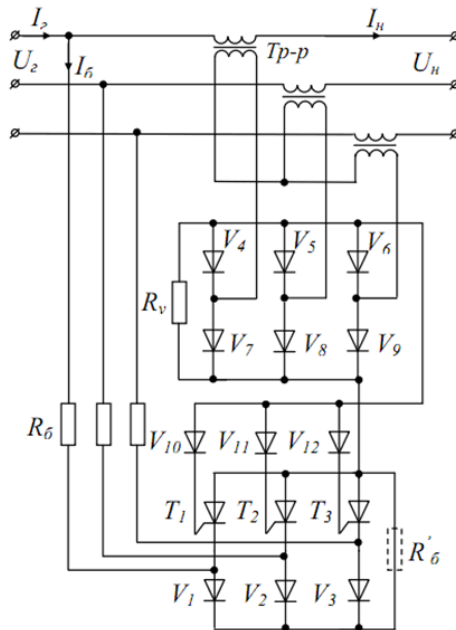


Рис. 1.9. Принцип роботи регулятора навантаження автобаластом

Цифровий регулятор частоти (ЦРЧ) метод регулювання з баластної навантаженням мікро- ГЕС, який має високий характер точності, а також узгодженість зі ступінчастим підключенням автобаласта.

Схема мікро-ГЕС із цифровим регулятором частоти. T - гідротурбіна обертає СГ - Γ , корисні навантаження по фазах $Z_{на}$, $Z_{нв}$, $Z_{нс}$ та баластові навантаження $R_{б1} \div R_{бN}$, яких підключають за допомогою біполярних тиристорів, керованих ЦРЛ. З еквівалентним навантаженням СГ, сумою навантажень на висновках електричної машини, при паралельному включенні баластного та корисного навантажень, визначають похибку регулювання (рис.1.10).

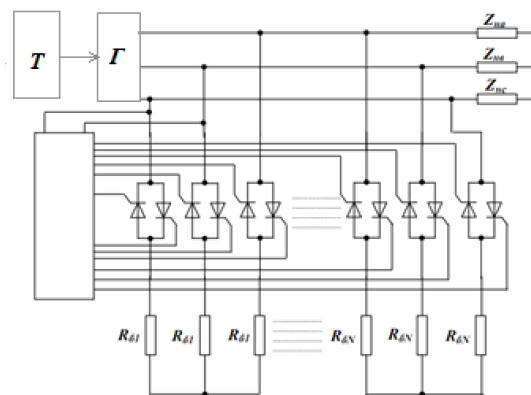


Рис. 1.10. Схема мікро-ГЕС з цифровими регуляторами частоти

Для зниження похибки керування однакових за потужністю навантаження необхідно ступінчасте збільшення баласту N . Цей випадок ускладнить конструкцію в масі, габариті і схеми регулятора, все це звичайно ж позначиться в ціні. Найбільш ефективним ЦРЛ може бути регулятор, в якому споживана потужність баластових навантажень чергуються щодо: $1, 2, 4, \dots, 2N$. У такому разі з'явиться можливість значно знизити кількість баластних навантажень, тим самим забезпечуючи рівномірність управління однакових за потужністю навантаження на всьому діапазоні. Наприклад, якщо приймемо потужність одного зі щаблів баласту $\Delta P = 5\%$ від повної потужності пристрою P , то при еквівалентних баластових навантаженнях їх число буде $N=20$. [6].

РОЗДІЛ 2

АСИНХРОННИЙ ГЕНЕРАТОР - ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Конструкція та принцип дії асинхронного генератора

Асинхронний генератор – це асинхронний двигун, який використовується в режимі генератора. Конструктивно асинхронна машина з коротко-замкненим ротором складається із статора, ротора, корпусу, підшипникових щитів, валу, вентилятора та кожуха. Пакет статора, що складається з листів електротехнічної сталі з розміщеною в ньому трифазною обмоткою, закріплюється в корпусі. По горизонталі до корпусу прикріплені щити підшипників, що мають посадкові місця для підшипників. Ротор, що так само складається з листів електротехнічної сталі, пресований на вал. Пакет ротора разом із валом розташовується усередині статора. Положення ротора фіксується відносно пакету статора підшипниками, які встановлюються в підшипникових щитах. Один кінець валу виходить із машини. На кінці валу передбачено шпонкову канавку. Вихідний кінець валу призначений для з'єднання машини з іншими механізмами. На іншому кінці валу розташований вентилятор. Вентилятор закритий кожухом, який спрямовує повітряний потік для охолодження корпусу машини зовні.

Таким чином, конструкція трифазної машини з короткозамкненим ротором представляється найпростіший з електричних машин, що обертаються. При експлуатації єдиний вузол, що вимагає профілактичного огляду та ремонту, це підшипники. Застосування сучасних підшипників та мастил може призвести до профілактики та ремонту машини тільки до заміни підшипників. В даний час випускається значна кількість асинхронних електродвигунів, які задовольняють споживачів, як за умовами експлуатації, так і за шкалою потужностей, придатні послужити як генератор [7-8].

Давно відомо, що електродвигуни споживають з мережі як активну, і реактивну складові від повної потужності. При цьому реактивна потужність

витрачається на створення та підтримання магнітного поля машини. Активна електрична потужність перетворюється на механічну, яка передається механізму. Ця картина спостерігатиметься доти, доки швидкість електродвигуна n менша за швидкість обертання магнітного поля n_c . У разі коли швидкості рівні $n_c = n$ споживана активна потужність з мережі стане рівною нулю $P=0$. У цьому реактивна потужність, споживана електричною машиною з мережі, змінюється, тобто. $Q = \text{const}$. Внаслідок того, що активна потужність дорівнює нулю, крутний момент на валу машини в руховому режимі дорівнюватиме нулю.

$$M_{em} = 0 \quad (2.1)$$

З цього випливає, що самостійно асинхронна електрична машина із синхронною швидкістю обертатися не може. Тому для того, щоб підтримувати таку швидкість, необхідно електродвигун обертати стороннім джерелом механічної потужності. Маючи таку можливість, швидкість електродвигуна можна підняти і більше синхронної $n > n_c$. У такому разі реактивна потужність продовжуватиме споживатися з мережі, оскільки магнітне поле машини не зникає. Активна потужність, своєю чергою, змінить свій напрямок. Іншими словами, асинхронна електрична машина з режиму двигуна перейде у режим генератора. При цьому в мережу віддається тільки активна потужність, реактивна продовжує споживатися з мережі. У разі, коли мережа, яку працює генератор, містить джерело реактивної енергії, робота генератора можлива. Якщо ж джерела реактивної енергії відсутні, то генератор втратить збудження.

2.2. Процес самозбудження асинхронного двигуна

Можна довести, що сама асинхронна машина не може під час роботи генератором виробляти реактивну потужність, необхідну підтримки електромагнітного поля. Тому при автономній роботі асинхронної машини як генератор необхідно передбачити джерело реактивної потужності, який би

підтримував магнітне поле машини. Як джерело можна використовувати компенсатори, інвертори, ємності та інші пристрої [3].

Розглянемо випадок, коли як джерело реактивної потужності використовуються статичні конденсатори, які включаються в обмотку статора досліджуваної машини згідно з рис. 2.1.

При обертанні машини під дією залишкового магнітного потоку $\Phi_{ост}$ не дорівнює нулю, на клеммах статорної обмотки з'явиться ЕРС, яка залежатиме від величини струму та швидкості обертання обмотки. При синусоїдальному розподілі індукції в зазорі ЕРС дорівнюватиме

$$E_{ост} = 4,44 \Phi_{ост} k f \quad (2.2)$$

Залишкова ЕРС викликає струм, що протікає ланцюгом «ємність-обмотка статора». Цей струм у свою чергу викликає збільшення магнітного потоку i , як наслідок, збільшення ЕРС і т.д. Процес збільшення ЕРС триватиме до того часу, поки остання досягне встановленого значення [3].

Існує кілька методик розрахунку значень ЕРС, що встановилися, скористаємося однією з них. Для простоти розглядатимемо лише одну фазу. Можна записати два рівняння:

$$\begin{aligned} E &= f(i_B); \\ i_B &= E / E_{\Sigma} E / X_c \end{aligned} \quad (2.3)$$

Ці рівняння розв'язуються графічно.

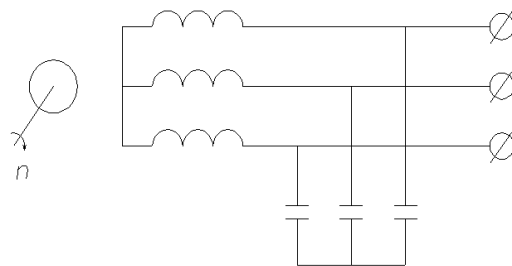


Рис. 2.1. Принципова схема включення збудливих конденсаторів

Точка А є точкою режиму роботи генератора, що встановився. Характеристика $E = f(i_B)$ називається характеристикою холостого ходу. Пряма проходить через початок координат є вольтамперною характеристикою ємності.

$$i_c = U_c / X_c, \quad tga = X_c \quad (2.4)$$

З графіка видно, що з певному значенні величини ємності, тобто. за певного значення $C_{кр}$, самозбудження машини стає неможливим. Така ємність називається критичною ($C_{кр}$). Критичній ємності відповідає пряма, яка стосується характеристики холостого ходу.

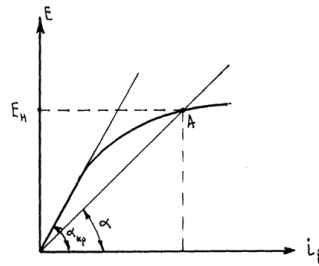


Рис. 2.2. До визначення робочої номінальної точки

Характеристика холостого ходу зазвичай знімається при оборотах, рівних номінальним [4]. Якщо зняти характеристики холостого ходу для різних оборотів, то отримаємо сімейство кривих, причому кожною кривою відповідатиме своя величина критичної ємності, і своє значення напруги, що встановилася. При збільшенні швидкості обертання машини, його частоти збільшується значення холостого ходу. При холостому ході ковзання машини вважатимуться величиною постійної. І тут можна показати, що частота лінійно залежить від оборотів і тоді

$$E_2 = 4,44 \Phi f W \quad (2.5)$$

Розглянемо форму кривої напруги ЕРС при неодруженому ході машини.

Вважатимемо, що в електричній машині розподіл індукції в повітряному зазорі синусоїдальний. При струмі збудження машини недостатньому для насичення магнітної системи, ЕРС також буде синусоїдальною. При подальшому збільшенні струму збудження форма кривої напруги все більше відрізнятиметься від синусоїдальної за рахунок насичення заліза машини.

Як можна побачити з наведених вище міркувань, для самозбудження асинхронної машини необхідний деякий магнітний потік. Зазвичай в електричних машинах є залишковий магнітний потік.

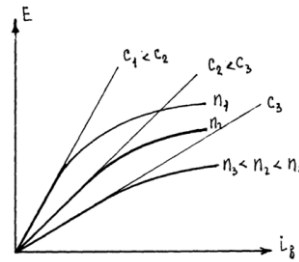


Рис. 2.3. Характеристики холостого ходу при мінливій частоті обертання ротора АТ

Це той магнітний потік, який залишається у магнітопроводі при зменшенні зовнішнього магнітного поля до нуля. Але в деяких випадках залишковий магнітний потік може бути занадто малий, або дорівнює нулю. У таких випадках машина також не сама порушиться. Розглянемо величину залишкового потоку, який буде необхідний самозбудження машини. Фактично форма характеристики холостого ходу має вигляд, показаний на рис. 2.4. Для забезпечення надійного самозбудження необхідно мати не три точки перетину, а одну, в області точки С. Точка є нестійкою точкою роботи, точка а стійка, але при напрузі, значно менше номінального. Отримати єдину стійку точку роботи машини можна так:

- 1) Забезпечити залишковий потік у залозі більше, ніж відповідний магнітний потік, що створює Єв.
- 2) Підвищити обороти в такий спосіб, щоб залишилася єдина точка перетину (точка «С2»).
- 3) Збільшити величину ємності, щоб отримати знову ж таки єдину точку «С3» [3].

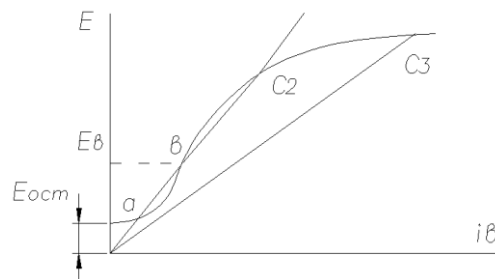


Рис. 2.4. Фактична форма кривої характеристики холостого ходу

Розглянемо випадок, коли залишкова ЕРС дорівнюватиме нулю. Це можливо при виконанні умови

$$\Phi_{ост} = 0 \quad (2.6)$$

Інакше кажучи, потрібно повністю розмагнітити машину. Це можна зробити кількома способами.

1. Створити зовнішнє магнітне поле з напруженістю, що дорівнює коерціативної сили.

2. Нагріти магнітопровід до температури більше точки Кюрі.

3. Помістити магнітопровід у змінне магнітне поле, амплітуда якого плавно зменшується до нуля. З огляду на умови експлуатації електричної машини малоймовірно виникнення двох перших ситуацій.

(Точка Кюрі для заліза =1000 К), але третя можлива, наприклад, без відключення корисного навантаження зменшити витрату води до нуля. Тоді струм статора (змінний) плавно зменшуватиметься до нуля, відповідно, і магнітний потік у машині також зменшиться до нуля. У такому випадку машину можна порушити тільки від стороннього джерела або електричного струму або магнітного потоку.

Як уже розглядалося, на холостому ході генератора характеристика холостого ходу $E=f(i_B)$ матиме вигляд, зображений на рис. 2.4. Тут точка «А» є точкою сталої роботи генератора. Знаючи необхідне значення напруги можна розрахувати величину ємності. Для цього необхідно спочатку зняти та побудувати характеристику холостого ходу. Далі, відклавши необхідне значення напруги за графіком, знаходимо величину струму збудження i_B . Знаючи струм збудження, можна розрахувати величину необхідної ємності

$$i_B = E i_{Xc} = U_h i_{Xc}, \quad (2.7)$$

де

$$Xc = i(\omega C) = i(2\pi f C). \quad (2.8)$$

Звідси отримаємо:

$$C = E_{\text{осм}} = \frac{4,44 \cdot \Phi_{\text{осм}} \cdot k f i}{(2\pi f X_c)} = \frac{i_B}{(2\pi f U)} \quad (2.9)$$

Величину збудливої ємності за цією формулою отримаємо у фарадах.

Реактивна потужність, що протікає через ємність і відповідно через машину дорівнюватиме:

$$Q = U I_p = \left(\frac{U}{X_c} \right) U = \frac{U^2}{X_c} = \frac{U^2}{(i/\omega C)} = \omega C U^2 = 2\pi f C U^2 \quad (2.10)$$

де f - частота струму, що протікає через ємність.

З цього виразу видно:

а) величина ємності при рівних реактивних потужностях обернено пропорційна частоті;

б) величина ємності при рівних реактивних потужностях обернено пропорційна квадрату напруги.

Висновки по розділу

Аналізуючи цей простий вираз видно, що для отримання однакової реактивної потужності вигідно підвищувати напругу на ємності, при цьому величина ємності зменшуватиметься назад пропорційно квадрату прикладеної напруги. Для того, щоб підвищити напругу, можна застосувати трансформатори, що підвищують. Схема включення може бути, як «зірка», так і «трикутник», але краще приймати «трикутник», оскільки за такої схеми на ємності подається лінійна напруга. Як відомо, лінійна напруга в V_3 більша за фазну, тому величина ємності зменшиться у $(V_3)^2$ рази. Трансформатори можна застосовувати як однофазні, так і трифазні.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В ГЕНЕРАТОРНОМУ РЕЖИМІ

3.1 Застосування асинхронних генераторів для мікро-ГЕС та експериментальне дослідження АТ у генераторному режимі

Вартість мікро-ГЕС може бути знижена за рахунок встановлення асинхронних генераторів із самозбудженням.

Асинхронні генератори в порівнянні з синхронними мають менший перехідний реактивний опір (0.1 проти 0.3), що сприятливо при запуску однофазного або трифазного рухового навантаження. Асинхронні машини з короткозамкнутою обмоткою ротора мають широке поширення, великий вибір потужностей і частот обертання, в режимі роботи генератора з самозбудженням вони можуть працювати на несиметричне навантаження без генерації гармонік напруги.

Проблеми застосування асинхронних генераторів пов'язані із забезпеченням їх самозбудження, можливістю регулювання напруги, регулювання частоти та проблеми нульового дроту, коли потрібно з'єднання, висновків у трикутник. Типове устаткування, необхідне роботи агрегату з асинхронним генератором, включає первинний двигун (турбіну), асинхронну машину з к.з. обмоткою ротора, схему врівноваження по фазах, статичний збудник (батарея конденсаторів) та регулятор навантаження.

Схеми заміщення для режиму асинхронного генератора показані на рис. 3.1. Пуск генератора відбувається за схемою 1а, а включена на навантаження за схемою 1б перехід з режиму в режим залежить від величини залишкової намагніченості, частоти обертання та ємності конденсаторів.

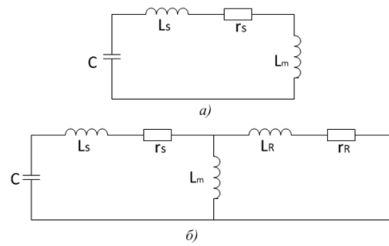


Рис. 3.1. Схеми заміщення: а-синхронний режим; б-асинхронний для самозбуджуваного асинхронного генератора

Параметри ланцюга при цьому постійні, крім індуктивності L_m , зміни якої відбуваються по кривій, показаній на рис. 3.1. Еквівалентний ланцюг для режиму синхронної машини (1а) є резонансним контуром, в якому вплив на величину напруги залежить від залишкового намагнічування ротора. Результати аналізу рівнів залишкового намагнічування дано на рис. 3.2. Розрахунок величин амплітуди струму в асинхронному режимі його зміна від частоти обертання показує, що для виникнення збудження синхронна частота обертання повинна бути перевищена.

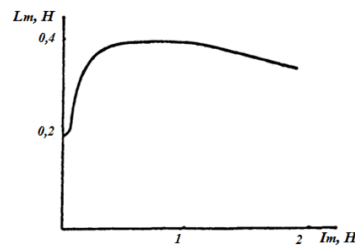


Рис. 3.2. Залежність індуктивності ланцюга, що намагнічує, від струму намагнічування

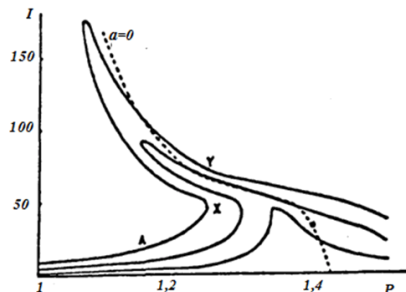


Рис. 3.3. Можливі точки роботи асинхронного двигуна в синхронному режимі для трьох рівнів залишкового намагнічування

Висока надійність пуску асинхронної машини може бути отримана при виконанні однієї з наступних умов:

- Пропускання постійного струму для отримання залишкового намагнічування;
- на висновках включатися конденсаторні батареї, що забезпечує самозбудження навіть за розмагніченого ротора;
- частота обертання збільшуватися вище за номінальну, що дозволить отримати резонансну частоту при низькому залишковому намагнічуванні;
- на висновках встановлюватимуться додаткові конденсатори, які зменшать резонансну частоту та номінальну частоту обертання генератора.

Останні два способи можуть призвести до перенапруг на генераторі. Фактично, залишкове намагнічування реальних асинхронних машин достатньо їх самозбудження.

При несиметричному навантаженні, для вирівнювання напруги, при з'єднанні в зірку, необхідна установка конденсатора, що регулюється.

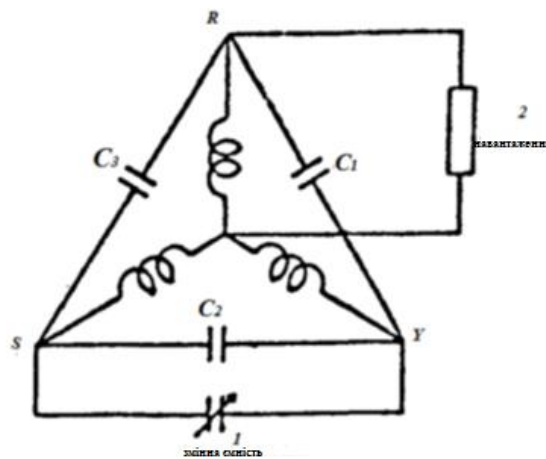


Рис. 3.4. Експериментальна схема, що використовується для визначення оптимального збудження при однофазному навантаженні: 1 - змінна ємність, 2 - навантаження

Для звичайних трифазних машин часто не передбачені нульові висновки обмоток, тоді можна застосувати схему балансування по фазах зі штучною нульовою точкою. Для однофазних мереж використовують з'єднання висновків у трикутник.

Підтримка рівня напруги навантаження при змінах реактивної потужності можна виконувати шляхом ступінчастого включення конденсаторів, для цього використовуються тиристори, що включаються паралельно з діодами.

Використання електронного регулятора навантаження знижує вартість установки за рахунок відмови від регулювання частоти обертання гідротурбіни і, відповідно, регулятора. Регулятор навантаження виконується з фіксованими ступенями та включенням ступенів при проходженні напруги через нуль. Чотири ступені баластного навантаження 1:2:4:6 дозволяють вибрати 15 ступенів регулювання.

3.2. Опис установки

В експериментальному стенді є асинхронний двигун, двигун постійного струму, батареї конденсаторів, пристрої живлення, що контролюють апарати, вимірювальні прилади. Схема важлива електрична дана на рис. 3.5.

Двигун постійного струму живиться через автотрансформатор Тр.1 та двох напівперіодних випрямлячів (Д1 – Д4). У якірному ланцюзі та ланцюзі обмотки збудження стоять контролюючі прилади РА1, РА2, РVI. Вимикач SI служить для напруги на пристрій живлення двигуна постійного струму. Резистор RI, включений у ланцюг обмотки збудження, призначений зміни швидкості обертання машини. Міняти швидкість обертання, а також забезпечувати плавний пуск дозволяє Тр.1, за допомогою якого можна регулювати напругу, що підводиться до двигуна.

Двигун постійного струму обертає асинхронну машину типу 4ААМ564У3. Порушення асинхронного генератора відбувається за допомогою батареї статичних конденсаторів (С1-С3). Величина ємності, включеної в кожен фазу, може поступово змінюватися (на схемі не показано). В обмотку статора асинхронного генератора включений вимірювальний комплект К51, що дозволяє вимірювати струми, напруги та потужності кожної фази, тобто $i_a; i_b; i_c$, $U_a, U_b; U_c; P_a; P_b; P_c$.

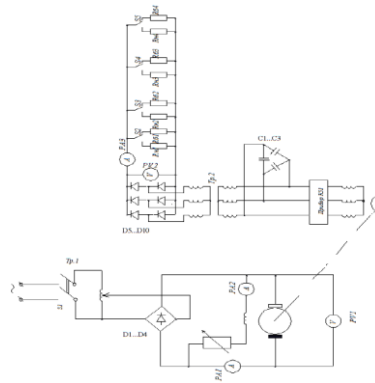


Рис. 3.5. Схема випробувальної установки

Частота обертання вимірюється за допомогою тахометра годинника. Навантаження, що підключається до генератора, носить суто активний характер, і є активними резистори, опір яких може змінюватися. Для отримання заданих ТЗ вихідних параметрів генератора навантаження підключена до нього через понижувальний трансформатор Тр.2 і трифазний випрямляч Д5 ... Д10. У ланцюг навантаження включені вольтметр РV2 та амперметр РА3.

Для підтримки постійних параметрів на виході при навантаженні R_n , що дискретно змінюється, схема передбачає можливість ступінчастого підключення баластових опорів R_b .

На рис. 3.6-2.29 представлені фотографії випробування АТ у генераторному режимі в лабораторних та натурних умовах.



Рис. 3.6. Випробувальний стенд



Рис. 3.7. Випробування АТ у генераторному режимі

3.3. Результати випробувань дослідного зразка асинхронного генератора

Як асинхронний генератор (АГ) випробовувався асинхронний електродвигун типу 4ААМ564УЗ, що має в руховому режимі наступні номінальні параметри: потужністю 180 Вт, номінальною частотою обертання 1370 об/хв, синхронною частотою обертання 1500 об/хв, струмом 0,67А, ККД 64%, коефіцієнтом потужності 0,64. Для зниження вихідної напруги з метою забезпечення необхідних за технічним завданням параметрів використовувалися три однофазних трансформатора типу ТН 46-220-50 і трифазний випрямляч, що містить шість діодів типу В.10. баластові опори, підключені до випрямляча. Стенд забезпечує п'ять ступенів навантаження (включаючи режим холостого ходу). При випробуваннях контролювалися вихідні параметри та показники на навантаженні, тобто. на виході установки постійного струму, і навіть безпосередньо на обмотці статора АГ тобто. на виході змінного струму. Слід підкреслити, що малопотужні трансформатори, які використовуються зниження вихідної напруги, мають невисокий ККД і тому самі є додатковим активно-індуктивним навантаженням для АГ.

У табл. 3.1. наведено результати випробування АГ при ємності, що дорівнює 3,5 мкФ, у різних режимах роботи. За даними таблиці побудовано показники, наведені на рисунках, з яких видно, що отримані криві якісно відповідають кривій намагнічування магнітопроводу АГ. Можна зробити

висновок, що при збільшенні частоти обертання понад 1800 об/хв машина входить у насичення та подальше збільшення обертів недоцільно.

Результати випробування АГ на дискретно змінюваному навантаженні наведені в табл. 3.1 і 3.2. Різні частоти обертання ротора АГ імітують різні витрати та напори води під час роботи АГ у складі міні-ГЕС. З метою дослідження впливу величини збудливої ємності на вихідні показники АГ випробування були наведені для ряду ємностей, що дискретно змінюються, в діапазоні від 2,5 до 4,5 мкФ. Межі цього діапазону було визначено розрахунковим шляхом з урахуванням власних параметрів АГ. Аналіз впливу величини ємності збудливих конденсаторів показав, що для цього АГ найбільш оптимальною є ємність 3,5 мкФ у кожній фазі статора АГ. При цьому враховувалися вихідні параметри постійного та змінного струму на виході схеми при крайніх значеннях величини навантаження. При подальшому збільшенні ємності машина насичується, а отже, вартості та габаритів системи збудження не призводять до збільшення вихідних параметрів АГ.

Характеристики АГ на виході змінного струму наведено на рисунку. З них видно, що при певних оптимальних значеннях збуджуючої ємності і частоті обертання, забезпечується необхідна за завданням вихідна потужність 100 Вт.

Характеристики АГ на виході постійного струму при різних частотах обертання наведені на рис. З них випливає, що безпосередньо на навантаженні забезпечується потужність у межах 60-70 Вт при напрузі 12-136. Зменшення корисної потужності на виході схеми постійного струму в порівнянні з потужністю безпосередньо самого АГ пояснюється наявністю в схемі понижуючих трансформаторів, що становлять частину загального навантаження АГ.

Зміна вихідної потужності АГ та напруги на навантаженні при різних величинах ємності конденсаторів та частотах обертання показані на рисунку нижче.

Таблиця 3.1 – Результати випробувань при різних оборотах АГ

Режим роботи	$U_{A,B}$	I_A, A	$P_A, Вт$	$P=, B$	$L=,A$	$P=, Вт$
n= 1500 об/хв						
0	194	0,60	6			
1	188	0,545	8	13		
2	176	0,51	24	17	14	15,4
n = 1630 об/хв						
0	234	0,79	6			
1	230	0,73	8	16		
2	220	0,69	36	13,5	1.8	24,3
n= 1730 об/хв						
0	250	0,87	6			
1	244	0,82	9	17,5		
2	236	0,78	36	15	2,0	30
n= 1800 об/хв						
0	262	0,95	6			
1	260	0,90	12	18,5		
2	250	0,86	48	15,5	2,0	31

Примітки:

- 1) 0-холостий хід при розімкненому ланцюгу статора АГ;
- 2) 1-холостий хід з підключеними до ланцюга статора АГ трансформаторами типу ТН46 - 220-50
- 3) 2-режим навантаження з включенням першого ступеня навантаження

Таблиця 3.2 – Результати випробувань при різних ємностях АГ

№ п/п	$U_{A,B}$	I_A, A	$P_A, Вт$	$P=, B$	$L=,A$	$P=, Вт$
а) $C = 3,5$ мкФ						
1	228	0,75	-	-	-	-
2	212	0,67	36	13	1,6	20,8
3	204	0,64	48	12	2,7	32,4
4	198	0,62	60	и	3,6	39,6
5	190	0,60	66	10	4,2	42
б) $C = 3,0$ мкФ						
1	216	0,62	-	-	-	-
2	194	0,54	30	12	1,5	18
3	188	0,52	42	11	2,5	27,5
4	178	0,49	48	9,5	3,2	30,4
5	170	0,47	54	9	3.8	34,2
в) $C = 2,5$ мкФ						
11	182	00,44	-	-		
22	134	00,31	12	8	1	8
33	108	00,25	12	5,5	1,3	7,2

Таблиця 3.3 – Результати випробувань АГ

№ п/п	U _A , В	I _A , А	P _A , Вт	P _г , В	L _г , А	P _г , Вт
а) C = 3.5 мкФ						
1	250	0.87	-	.	.	
2	236	0.78	48	15	1.9	28,5
3	228	0.75	60	13.5	3.2	43.2
4	220	0.73	78	12.5	4.2	50.4
5	214	0.71	90	11.5	4.9	56.4
б) C = 3.0 мкФ						
1	244	0.75	-	-	-	-
2	226	0.66	42	14	1.8	25.2
3	218	0.64	60	13	3.0	39
4	212	0.62	72	12	3.9	46.8
5	204	0.60	84	11	4.9	53.9
в) C = 2.5 мкФ						
1	220	0,56	-	-	-	-
2	194	0.47	24	12	1.3	15.6
3	178	0.43	36	10	2.3	23
4	164	0.40	42	9	2.9	26.1
5	150	0.37	42	8	3,2	25.5

Таблиця 3.4 – Результати випробувань АГ

№ п/п	U _A , В	I _A , А	P _A , Вт	P _г , В	L _г , А	P _г , Вт
а) C = 3,5 мкФ						
1	270	0,98	-	-	-	-
2	254	0,88	48	16	2.0	32
3	246	0,84	72	14,5	3,4	49,3
4	238	0,81	90	13,5	4,5	60,8
5	232	0,79	102	12,7	5,4	68,6
б) C = 3,0 мкФ						
1	262	0,84	-	-	-	-
2	246	0,74	42	15,5	1.6	24,8
3	234	0,71	60	14	3,2	44,8
4	228	0,69	72	13	4,3	55,9
5	224	0,68	96	12	5,2	62,4
в) C = 2.5 мкФ						
1	246	0,65	.	-	-	-
2	224	0,56	36	14	1.7	23,8
3	212	0,54	48	12	2,8	33,6
4	200	0,51	60	11	3,7	40,7
5	192	0,49	72	10	4,3	43

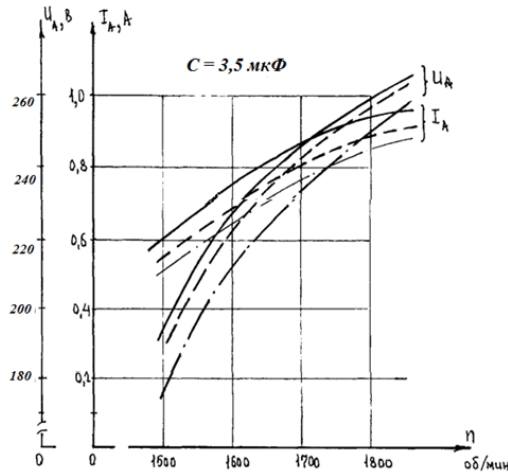


Рис. 3.8. Параметри на виході генератора змінного струму 1. _____ ланцюг статора розімкнено. 2. _ _ _ до статора підключений трансформатор 3. режим навантаження

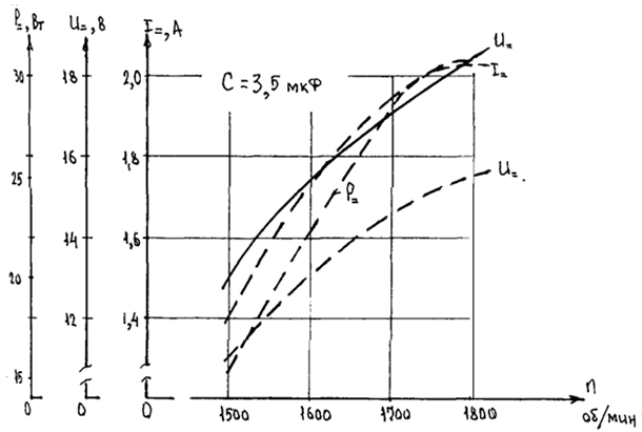


Рис. 3.9. Параметри на виході схеми постійного струму 1. _____ до статора підключено трансформатор 2. _ _ _ режим навантаження

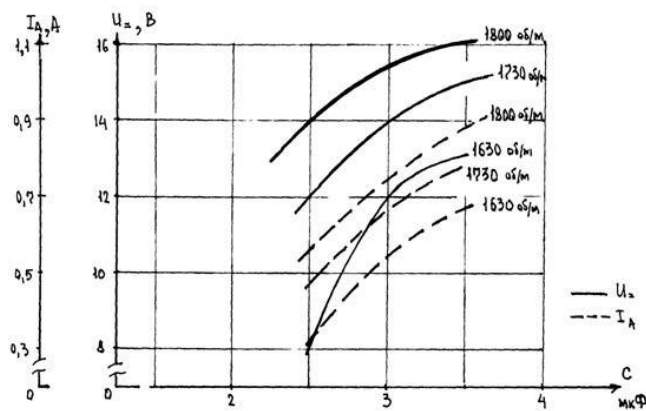


Рис. 3.10. Вплив ємності конденсаторів на вихідні показники АГ на першому ступені навантаження

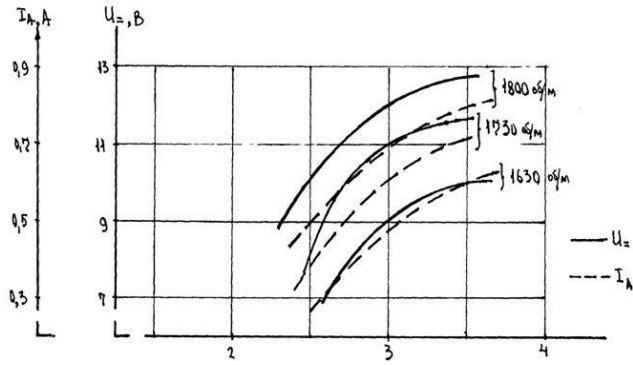


Рис. 3.11. Вплив ємності конденсаторів на вихідні показники АГ на четвертому ступені навантаження

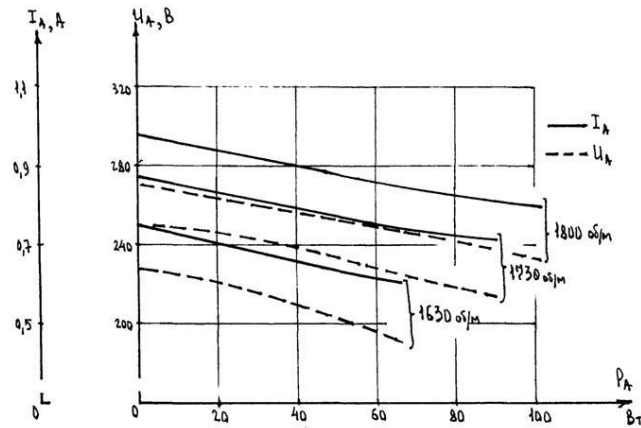


Рис. 3.12. Характеристика АГ на виході змінного струму при $C=3,5$

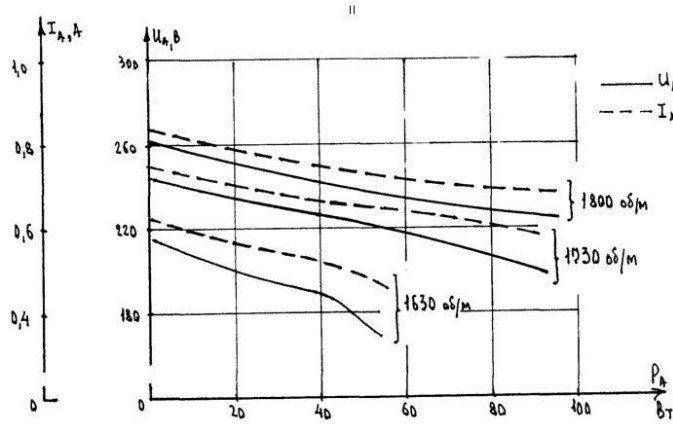


Рис. 3.13. Характеристика АГ на виході змінного струму при $C=3,0$ мкФ

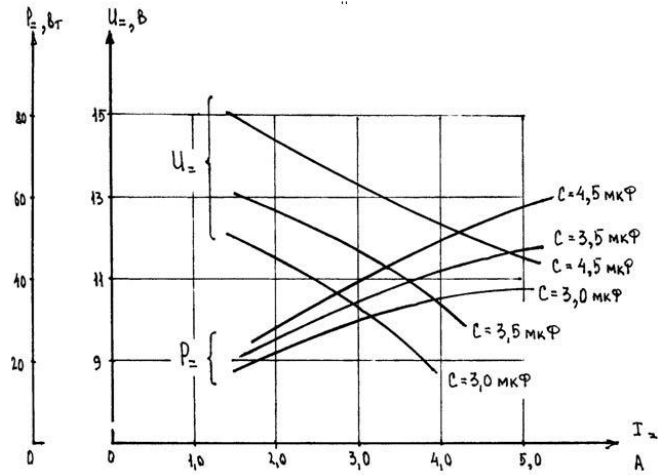


Рис. 3.14. Характеристика АГ на виході постійного струму при $n=1630$ об/хв

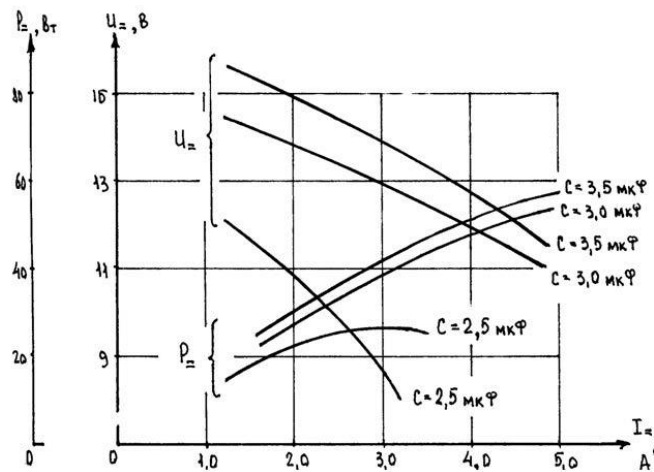


Рис. 3.15. Характеристика АГ на виході постійного струму при $n=1730$ об/хв

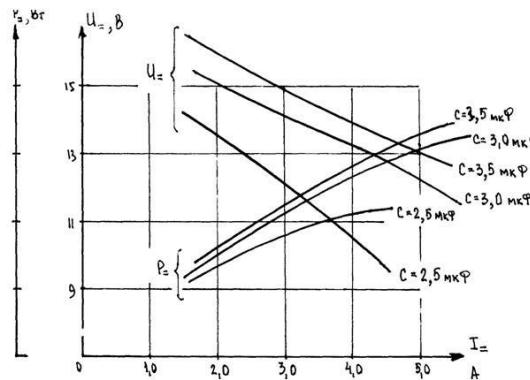


Рис. 3.16. Характеристика АГ на виході постійного струму при $n=1800$ об/хв

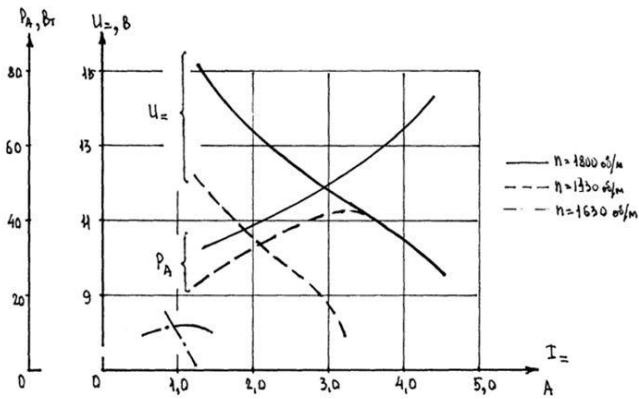


Рис. 3.17. Характеристика АГ при $C = 2,5$ мкФ

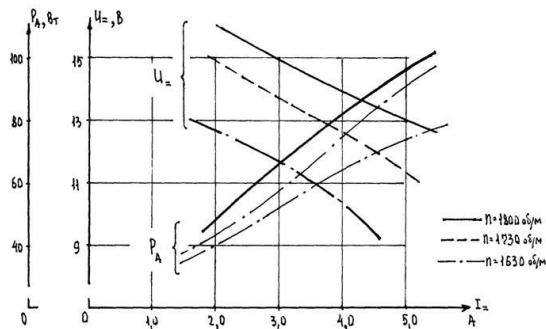


Рис. 3.18. Характеристика АГ при $C = 3,5$ мкФ

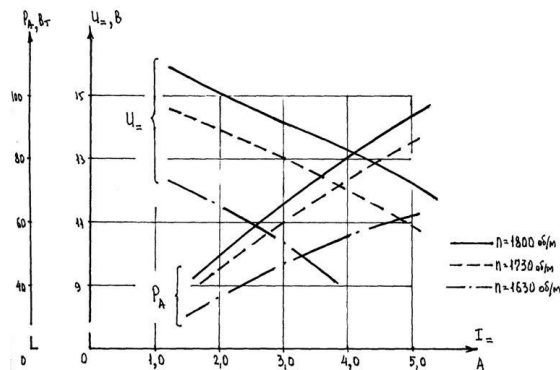


Рис. 3.19. Характеристика АГ при $C = 3,0$ мкФ

Висновки по розділу

Експериментуючи, збудження АГС під навантаженням із врахуванням вихідних параметрів постійного та змінного струму на виході схеми, за крайніх значень величини навантаження, одержали, що за подальшого збільшення ємності машина насичується, а отже, вартості та габаритів системи

збудження, не призводять до збільшення вихідних параметрів АГ. За економічними підрахунками найбільш вигідною є схема з'єднання АГС "зірка-трикутник". Величина ємності має бути в діапазоні $C_n = 0,9-1,1$;

ВИСНОВКИ

У цій роботі виконано завдання створення ефективних, безбаласних, автоматизованих мікро-ГЕС, які призначені для енергопостачання автономних сільськогосподарських споживачів малої потужності, оснащені системами стабілізації частоти та напруги, незалежного від відсотка споживаного корисного навантаження.

Експериментальним шляхом була зафіксована швидкість обертання ротора АГ, приєднаного через ремінну передачу до дворазової турбіни, за відсутності споживаного навантаження частково, і в цілому. При другому випадку, розгін швидкості досягав в 1,7 - 1,8 рази вище за номінальний і не досягав 2-х кратного розгону. При цьому частота електричного струму та напруги збільшувалася відповідно. Однозначно, що при повній відсутності баластного навантаження та часткового використання електроенергії споживачем розгін швидкості обертання ротора АГ не перевищить 1,8 рази.

Як показала практика, понад 85% споживачів електроенергії автономної генерації віддають перевагу однофазній мережі, оскільки побутові споживачі розраховані на однофазну мережу.

Вироблення електроенергії АСГ з використанням ІНМ не тільки зменшить вартість мікро-ГЕС, але й робить більш зручним у використанні споживання електроенергетичних потужностей для автономних однофазних споживачів, тим самим виключаючи можливості несиметричного підключення навантаження споживачам, які не мають класифікацію в електроенергетиці.

Розроблено основи проектування, за даними водотоку та генерованої електроенергії автоматизованої електроустановки для різних характеристик електричного навантаження, низьконапірних мікро-ГЕС.

СПИСОК ВИЕОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні. Звіт підготовлено в рамках проекту «Секретаріат та Експертний хаб з енергоефективності», що впроваджується Програмою розвитку ООН в Україні за підтримки Уряду Республіки Словачія та сприяння Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства в Україні. 2017 р.
2. Кудря С.О. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / С.О. Кудря, Л.В. Яценко, Г.П. Душина та інші // К: ІНМтитут відновлюваної енергетики НАН України, 2008. 60 с.
3. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 25.09.2008 р. №601-VI. Законодавство України : база даних. Верховна Рада України. Дата оновлення: 21.07.2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення 25.03.2020).
4. Шидловський А.К. Енергоефективність і відновлювальні джерела енергії. Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. 560 с
5. Бабець, І., 2017. Забезпечення енергетичної безпеки України в умовах геополітичних трансформацій. Актуальні проблеми міжнародних відносин. Випуск 132, с. 126-137.
6. Лежнюк П.Д. Визначення оптимальної потужності резерву для забезпечення балансової надійності локальної електричної системи. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний ІНМтитут»*. Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». 2016№42. С. 69–75.
7. Лежнюк П.Д. Вплив відновлюваних джерел енергії на функціонування розподільних електричних мереж. Енергетика та електрифікація. 2015. №1. С. 8-12.
8. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. : в 2 т. / Беллендир Е. Н. и др. С. – Петербург : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2004. Т. 2. 524 с.

9. Маляренко В. А. Енергетика і навколишнє середовище. Харків: САГА, 2008. 364 с.
10. Праховник А. В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения. Київ: Освіта України, 2007. 464 с.
11. Лятхер В. М. Оценка надежности гидросооружений. Гидротехническое строительство. 1985. № 22. С. 6–12.
12. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 78 с.
13. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду і вибір параметрів функції розподілу максимальної товщини льоду за статистичними даними. Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб. Київ: Техніка, 2011. Вип. 101. С. 123–127.
14. Кудря С.О., Головка В.М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії. Київ, 2009. 201 с
15. Праховник А. В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения. Київ: Освіта України, 2007. 464 с.