

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК _____

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і
енергозбереження

_____/Каплун В.В./
(підпис)
« ____ » _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

_____/Окушко О.В./
(підпис)
« ____ » _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження характеристик компенсованого асинхронного генератора»

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

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В.І.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Чуєнко Р.М.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Феньо О.І.
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

доцент, к.т.н. /ОКУШКО О.В./
вчене звання і ступінь підпис
” ” 2026 р.
число місяць рік

ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту

Феньо Олександр Івановичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

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

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи: «Дослідження характеристик компенсованого асинхронного генератора»

затверджена наказом ректора НУБіП України від « »

Термін подання завершеного проєкту на кафедру _____
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи:

- 1) Правила улаштування електроустановок (ПУЕ).
- 2) Правила будови електроустановок (електрообладнання спеціальних установок).
- 3) Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.
- 4) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Перелік питань, які потрібно розробити:

- 1) Аналіз стану, перспектив і напрямків реалізації завдань.
- 2) Технологічна частина.
- 3) Теоретичне дослідження характеристик компенсованого асинхронного генератора за різних схем компенсації.
- 4) Експериментальне дослідження характеристик компенсованого асинхронного генератора на реальній фізичній моделі за різних схем компенсації.
- 5) Охорона праці.
- 6) Висновки. Список використаних джерел.

Перелік графічних документів (за потреби):

Дата видачі завдання_____

Керівник магістерської роботи

Чуєнко Р.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

Феньо О.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота висвітлює науковий напрям вирішення задачі використання явища внутрішньої ємнісної компенсації в електромеханічних асинхронних комплексах.

У роботі встановлено закономірності вибору величин компенсуючих ємностей компенсованого асинхронного генератора в режимі пуску та за динамічно змінюваного навантаження компенсованого асинхронного двигуна для підвищення енергоефективності автономних систем електроживлення

Робота містить вступ, три розділи, загальні висновки та список використаних джерел. Загальний обсяг становить понад 65 сторінок основного тексту. У роботі представлено 15 рисунків та 5 таблиць. Список використаних джерел налічує 38 найменувань.

Стислий виклад основного змісту:

У першому розділі з метою обґрунтування можливостей підвищення ефективності компенсованих асинхронних генераторів у АЕК, вивчення особливостей фізичних принципів і методів їх дослідження, режимів роботи асинхронного генератора з різними способами збудження реактивними струмами був проведений аналіз асинхронного генератора з внутрішньою ємнісною компенсацією реактивної потужності.

Змодельовано математичну модель автономного асинхронного генератора базової конструкції збудження якого відбувається від зовнішнього джерела реактивної потужності(ААГ), яким є батарея електричних конденсаторів включена на виході генератора паралельно навантаженню та проаналізовано характеристики такого способу компенсації.

Змодельовано математичну модель компенсованого автономного асинхронного генератора (КААГ) виконаного на базі трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у якому обмотку статора ділять на дві рівні частини кожна з кутром $\Theta = 30^\circ$ між осями напівобмоток. Напівобмотки статора

з'єднують по схемі поворотного АТ на електричну ємність C_{Δ} . Проаналізовано характеристики такого способу компенсації.

Змодельовано математичну модель узагальненого компенсованого автономного асинхронного генератора (УКААГ) виконаного на базі трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у якому обмотку статора ділять на дві рівні частини кожна з кутром $\Theta = 30^\circ$ між осями напівобмоток. Напівобмотки статора з'єднують по схемі поворотного АТ на електричну ємність C_{Δ} вторинна обмотка шунтується додатковою електричною ємністю C_k . Проаналізовано характеристики такого способу компенсації.

У другому розділі проведені експериментальні дослідження автономного електромеханічного комплексу, що складається з компенсованого асинхронного генератора та асинхронного електродвигуна, з метою вивчення якісної картини дії фізичних процесів компенсованих асинхронних машинах, отримання фактичних кількісних показників на реальній фізичній моделі, перевірки раніше отриманих результатів обчислювальних експериментів та підтвердження позитивних особливостей перед базовими машинами.

У третьому розділі висвітлено основні вимоги з охорони праці та техніки безпеки під час роботи з електрообладнанням у лабораторних умовах. Розглянуто вплив електричного струму на організм людини, основні причини виникнення електротравм та заходи їх запобігання. Наведено правила безпечної експлуатації електроустановок, вимоги до підготовки робочого місця, порядок роботи з електрообладнанням та дії після завершення роботи. Також описано порядок дій у аварійних ситуаціях, правила надання першої долікарської допомоги при ураженні електричним струмом, опіках та інших нещасних випадках. Особливу увагу приділено дотриманню правил електробезпеки, використанню засобів захисту та організації безпечних умов праці в лабораторії.

Висновки:

Досліджена робота компенсованого асинхронного генератора на автономну мережу зі змінним навантаженням, у результаті якого одержано закон регулювання співвідношень між зовнішніми та внутрішніми ємностями

для підтримання напруги у заданих межах. Величина зовнішньої, внутрішньої та додаткової ємності при змішаному та додатковому збудженні становлять відповідно, 30–35; 50–55; 10–15 мкФ у кожній фазі на 1 кВт потужності генератора.

На відміну від відомих компаундованих асинхронних генераторів, які потребують великих ємностей при паралельному їх включенні з навантаженням, використання автономного асинхронного генератора з включення двох робочих напівобмоток статора за схемою поворотного автотрансформатора на компенсуючу ємність, значною мірою, забезпечує стабілізацію напруги. Доведено, що конструктивним удосконаленням компенсованого асинхронного генератора, порівняно з базовою машиною, є поділ фазної зони обмотки статора на дві рівні частини з просторовим зміщенням їх між собою на кут $\Theta = -30^\circ$. Це дало змогу за незмінної реактивної потужності навантаження, знизити споживання реактивної потужності компенсованого автономного асинхронного генератора на 15–20 % у порівняно з базовим.

Ключові слова: ААГ – автономний асинхронний генератор з зовнішнім (паралельним) ємнісним збудженням, виконаний на базі серійного асинхронного двигуна;

КААГ – компенсований автономний асинхронний генератор зі змішаним ємнісним збудженням;

УКААГ – узагальнений компенсований автономний асинхронний генератор зі змішаним ємнісним збудженням з додатковим ємнісним підмагнічуванням.

ЗМІСТ

Вступ	9
1. Методичні аспекти математичного моделювання автономних асинхронних генераторів з внутрішньою ємнісною компенсацією	11
1.1. Особливості впливу внутрішньої ємнісної компенсації на характеристики та ефективність автономного асинхронного генератора	12
1.2. Автономний асинхронний генератор зі змішаним ємнісним збудженням	18
1.2.1. Математичне моделювання автономного асинхронного генератора зі змішаним ємнісним збудженням	18
1.2.2. Дослідження зовнішніх характеристик автономного асинхронного генератора зі змішаним ємнісним збудженням при статичному навантаженні	24
1.3. Автономний асинхронний генератор зі змішаним та додатковим ємнісним збудженням	27
1.3.1. Математичне моделювання роботи автономного асинхронного генератора зі змішаним та додатковим ємнісним збудженням	27
1.3.2. Дослідження зовнішніх характеристик автономного асинхронного генератора зі змішаним та додатковим ємнісним збудженням при накиді навантаження	34
2. Експериментальні дослідження автономного автономного електромеханічного комплексу з компенсованими машинами	41
2.1. Експериментальна установка для дослідження асинхронного електромеханічного комплексу з компенсованими машинами	41
2.2. Методика експериментальних досліджень асинхронного електромеханічного комплексу	46
2.3. Результати експериментальних досліджень та їх аналіз	50

3. Охорона праці при експлуатації електричних пристроїв та електрообладнання	56
3.1. Загальні положення	56
3.2. Вимоги безпеки перед початком роботи	59
3.3. Вимоги безпеки під час роботи	60
3.4. Вимоги безпеки по закінченню роботи	61
3.5. Вимоги безпеки в аврїних ситуаціях	61
Висновки	65
Список використаної літератури	67

ВСТУП

Розвиток сільських господарств зумовлює підвищення попиту на автономні джерела електроживлення. Це пов'язано, насамперед, із недостатньою надійністю централізованого електропостачання та якістю електроенергії, що, у свою чергу, порушує технологічні процеси і спричиняє збитки, викликані недоотриманням та втратами сільськогосподарської продукції. Застосування у сільському господарстві електроприймачів критичної групи за надійністю електропостачання, впровадження інформаційних технологій, телекомунікаційних систем, цифрових систем автоматики вимагають від автономних джерел електроенергії забезпечення нормативних вимог до якості електричної енергії та надійності електроживлення.

Основними струмоприймачами за потужністю у сільському господарстві є електроприводи, що становлять 66...74 %. Особливостями електрозабезпечення різноманітних технологічних процесів, пов'язаних із приготуванням, зберіганням, переробкою сільськогосподарської продукції є віддаленість або відсутність централізованого електропостачання (робота в полі, живлення сільськогосподарських електротехнологічних установок, електроінструменту тощо; найчастіше застосовують струмоприймачі потужністю до 10 кВт.

Режими роботи автономних джерел електроживлення характеризуються різко змінюваним навантаженням і потребують застосування спеціалізованого обладнання. Особливо це стосується випадків, коли від автономного джерела здійснюється прямий пуск асинхронних короткозамкнених двигунів сумірної потужності. Значні пускові струми впливають на зменшення напруги на шинах автономного джерела і без прийняття спеціальних заходів усталена робота увімкнених паралельно з асинхронними двигунами сумірної потужності споживачів стає неможливою, а електродвигуни, що вмикаються, розганяються дуже повільно або й зовсім не розвертаються. Традиційне обрання завищеної потужності автономних джерел електроживлення, що забезпечує успішний запуск асинхронних двигунів, неминуче призводить до зростання їх

масогабаритних показників, надлишкових капітальних витрат, а також витрат на експлуатацію.

У роботі висвітлений науковий напрям вирішення задачі використання явища внутрішньої ємнісної компенсації в електромеханічних асинхронних комплексах.

Встановлено закономірності вибору величин компенсуючих ємностей компенсованого асинхронного генератора в режимі пуску та за динамічно змінюваного навантаження компенсованого асинхронного двигуна для підвищення енергоефективності автономних систем електроживлення.

1. МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНИХ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ З ВНУТРІШНЬОЮ ЄМНІСНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ

Одним із основних елементів АЕК є компенсований асинхронний генератор (КАГ). Особливістю побудови математичної моделі при вивченні фізичних процесів компенсованого асинхронного генератора у складі АЕК є представлення різноманітних просторово-часових орієнтацій струмів статора і ротора приведених до єдиної осі. Для достовірності встановлення властивостей і закономірностей буде розглянута робота КАГ в усталеному симетричному режимі, що дасть змогу записувати рівняння електричної рівноваги, зображати принципові схеми заміщення, векторні діаграми для однієї фази. Відносно ЕРС визначатимуться рівняння електричної рівноваги двох головних контурів кола статора зі струмами $\dot{I}_1$ і $\dot{I}_\Delta$, ($\dot{I}_{ck}$). По балансу дійсної складової всіх струмів КАГ отримається r_2/S і S , по балансу реактивної складової x_m , що задовольнить задане навантаження і всі параметри генератора. Використовуючи криву намагнічування асинхронної машини по величині x_m знайдеться ЕРС E_1 , визначаться комплексні значення основних струмів КАГ, потім інші величини, необхідні для розрахунку і побудови характеристик.

Вище наведена методика розрахунку дійсна таких модифікацій асинхронних генераторів:

ААГ – автономний асинхронний генератор з зовнішнім (паралельним) ємнісним збудженням, виконаний на базі серійного асинхронного двигуна;

КААГ – компенсований автономний асинхронний генератор зі змішаним ємнісним збудженням;

УКААГ – узагальнений компенсований автономний асинхронний генератор зі змішаним ємнісним збудженням з додатковим ємнісним підмагнічуванням.

З метою обґрунтування можливостей підвищення ефективності компенсованих асинхронних генераторів у АЕК, вивчення особливостей фізичних принципів і методів їх дослідження, режимів роботи асинхронного генератора з різними способами збудження реактивними струмами буде проведений аналіз асинхронного генератора з внутрішньою ємнісною компенсацією реактивної потужності.

1.1. Особливості впливу внутрішньої ємнісної компенсації на характеристики та ефективність автономного асинхронного генератора

В автономному асинхронному генераторі базової конструкції збудження відбувається від зовнішнього джерела реактивної потужності, яким є батарея електричних конденсаторів включена на виході генератора паралельно навантаженню. При цьому конденсатори забезпечують реактивною потужністю як сам генератор, так і навантаження, компенсуючи реактивну складову, тому реактивна потужність зовнішнього джерела, що забезпечується конденсатором C перевищує повну потужність генератора, а $\cos\phi$ самого генератора значно менше одиниці $Q_c = 702,8 \text{ ВАр}$ при $U_n = 230 \text{ В}$, $Q_z = 385,5 \text{ ВАр}$, $Q_n = 317,3 \text{ ВАр}$, $S_z = 576 \text{ ВАр}$.

Компенсований асинхронний генератор з внутрішньою ємнісною компенсацією має дві обмотки статора просторово зміщені одна відносно одної на кут Θ і з'єднані по схемі поворотного автотрансформатора на електричну ємність C_Δ [6]. При цьому у часі зміщені вектори ЕРС обмоток E_1 і E_Δ , між ними по схемі автотрансформатора вихідна напруга $\dot{U}_{c\Delta} = \dot{U}_\Delta - \dot{U}_1 \approx \dot{E}_\Delta - \dot{E}_1$, а струм I_Δ ємності C_Δ випереджає напругу $\dot{U}_{c\Delta}$ на 90° (рис. 1.10).

Таким чином, струм I_Δ , що протікає по вторинній (додатковій) обмотці автотрансформатора по відношенню до напруги генератора $\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1 - jx_1 \cos\Theta \dot{I}_\Delta$ при $\dot{U}_\Delta = \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_1 - jx_1 \cos\Theta \dot{I}_1$ є активно-ємнісним і

частково забезпечує генератор ємнісною енергією. Струм I_1 основної обмотки як і у базовому генераторі є активно-індуктивним, а його реактивна складова як частина струму збудження генератора живиться від реактивних джерел C і C_Δ . Загальний струм генератора $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$ наближається до активного, при тому власний $\cos\varphi$ генератора наближається до одиниці.

Струм намагнічування генератора I_0 створюється сукупною дією всіх струмів, просторово приведених до осі основної обмотки статора. При цьому струм додаткової обмотки має вигляд $I_\Delta e^{-j\Theta}$ і у складі загального струму намагнічування $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta} + \dot{I}_2$ додатково підмагнічує систему, створюючи в обмотках статора додаткову ЕРС $E_{\Delta 1m} = -jx_m I_\Delta e^{-j\Theta}$, підвищує напругу на виході генератора.

Таким чином, активно-ємнісний струм $\dot{I}_\Delta$ у процесі намагнічування генератора відіграє подвійну роль:

1. Безпосередньо електричним шляхом разом з індуктивно-активним струмом $\dot{I}_1$ (по схемі поворотного автотрансформатора) створюють загальний струм $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$, наближений до активного і підвищують $\cos\varphi$ генератора.

2. Здійснює підмагнічуючий вплив на генератор, збільшуючи загальний струм намагнічування, який електромагнітним шляхом впливає на ЕРС обмоток, з ростом навантаження стабілізує величину ЕРС обмоток і вихідної напруги генератора.

Як наслідок, компенсований асинхронний генератор з внутрішнім ємнісним підмагнічуванням споживає реактивну потужність меншу, ніж базовий генератор з зовнішнім ємнісним збудженням, за рахунок подвійної дії струму I_Δ у процесі підмагнічування.

Розрахунок компенсованого автономного асинхронного генератора при $x_c=102$, $x_{c\Delta}=60$ Ом при напрузі $U_n=230$ В, показав, що його загальна реактивна потужність складає $Q_c + Q_{c\Delta} = 514,5 + 132 = 646,5$ ВАр, що менше за

702,8 ВАр у базовому генераторі. При незмінній реактивній потужності навантаження, реактивна потужність самого генератора складає $Q_2 = Q + Q_{c\Delta} = 198 + 132,3 = 330,3$ ВАр (для базового автономного асинхронного генератора $Q_2 = 385$ ВАр) споживання реактивної потужності для забезпечення тих же параметрів генератора і навантаження знижується на 15–20 % (на даному прикладі співвідношень ємностей на 16,7 %) [22].

Зі зростанням навантаження збільшується активна і реактивна складові струму. При цьому збільшуються активні складові струмів робочих обмоток статора I_1 і I_{Δ} , але реактивний струм зовнішньої ємності зменшується (за рахунок зниження напруги). При цьому реактивна складова струму I_1 як основна частина намагнічуючого струму I_0 при зниженні напруги і збільшенні реактивної складової навантаження різко падає, що призводить до розмагнічування генератора. Загальний струм I_1 зменшується. А активно-ємнісний струм I_{Δ} додаткової обмотки статора зростає за рахунок навантаження. Реактивна потужність $Q_{c\Delta} = I_{\Delta}^2 x_{c\Delta}$, що виробляється конденсатором C_{Δ} збільшується при навантаженні, що таким чином знижує розмагнічування генератора і збільшує ступінь жорсткості зовнішніх характеристик (див. порівняння рис. 1.9, 1.15)

Отже, ефект внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності асинхронного генератора здійснюється поєднанням електричного і електромагнітного обміну реактивною потужністю між його внутрішнім джерелом та взаємоіндуктивними обмотками, підмагнічуючою дією ємнісного струму, і проявляється:

- у зниженні споживання реактивної потужності генератора для його збудження на 15–20 % в порівнянні з базовим генератором, підвищенні $\cos\varphi_2$ (до 0,9 у базового генератора $\cos\varphi_2 \cong 0,745$);

- у підвищенні ступеня жорсткості зовнішніх характеристик за рахунок росту струму I_{Δ} як ємнісного струму навантаження поворотного

автотрансформатора при просторовому зміщенні його відносно струму основної обмотки.

Досліджений вплив власних параметрів генератора (базової машини) та внесених параметрів (зовнішньої і внутрішньої ємності C і C_{Δ}), величини і знаку кута Θ на характеристики і в цілому на ефективність компенсованого автономного асинхронного генератора. При цьому встановлено, що залежність напруги $U_{C\Delta}$ на виході автотрансформатора від величини кута Θ ($U_{C\Delta} = 2U \sin \frac{\Theta}{2}$) і невелика зміна величини струму I_{Δ} при $\Theta = -30^\circ$ проявляються у недостатньому зростанні реактивної потужності $Q_{C\Delta}$ зі збільшенням навантаження генератора і малої ступені зміни жорсткості зовнішніх характеристик порівняно з базовим асинхронним генератором. Збільшення $U_{C\Delta}$, $I_{C\Delta}$, а відповідно $Q_{C\Delta}$ можна отримати при збільшенні кута Θ до -60° , -90° (рис. 1.3), але це призводить до ускладнення схеми обмотки і необхідності збільшення величин C і C_{Δ} для отримання тих же вихідних параметрів при заданому навантаженні.

Тобто, найкращим варіантом схеми обмотки статора є кут $\Theta = -30^\circ$, що технологічно забезпечується простим поділом фазної обмотки трифазного базового асинхронного генератора на дві фазні зони по 30° кожна.

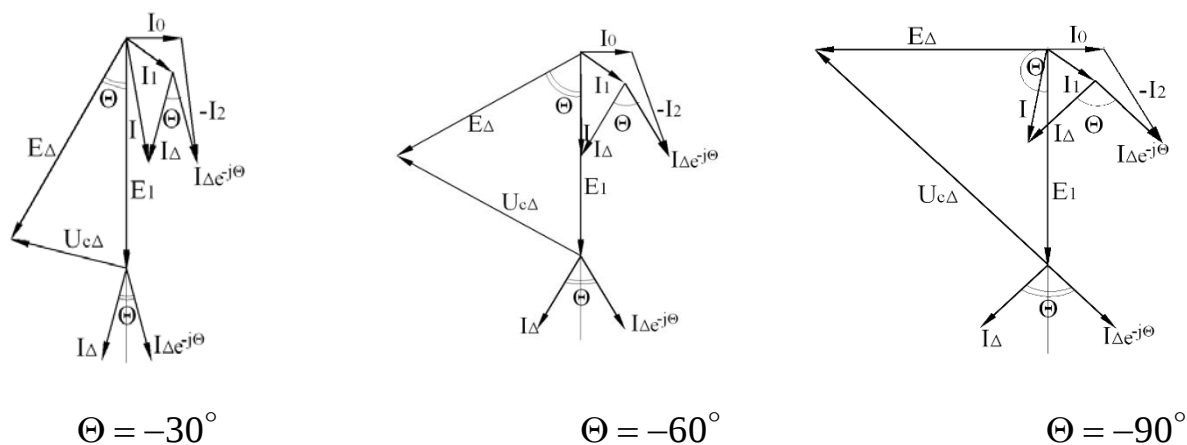


Рис. 1.1. Вплив величини кута Θ ($\Theta = -30^\circ$, $\Theta = -60^\circ$, $\Theta = -90^\circ$) на величину і фазу $U_{c\Delta} = 2U \sin \frac{\Theta}{2} \approx \dot{E}_\Delta - \dot{E}_1$, I_Δ , $I_\Delta e^{-j\Theta}$, $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 - \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta}$, $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$

Проведені розрахунки для визначення найбільш оптимального співвідношення між ємностями C і C_Δ (рис. 1.2) [5]. Визначені залежності між опорами x_c і $x_{c\Delta}$ при забезпеченні параметрів $U_n = 230\text{В}$, $I_p = 2,3\text{ А}$, $Z_n = Z_{нб} = 80 + j60$ при $\cos\varphi = 0,8$.

Визначений найбільш сприятливий режим роботи КААГ при навантаженні. Він відповідає рівності струмів напівобмоток статора, $I_1 = I_\Delta$, визначається перетином графіків залежностей цих струмів від струму навантаження (рис. 1.7) при $x_c = \text{const}$, $x_{c\Delta} = \text{const}$, або від величини $x_{c\Delta}$ (рис. 1.2) при $U_n = \text{const}$, $Z_n = \text{const}$. Такий режим є режимом нормального збудження генератора, рекомендується його застосовувати в якості номінального для КААГ: відповідає однаковому тепловому стану обмоток статора, мінімуму споживання реактивної потужності Q_Σ на створення магнітного поля, максимальному $\cos\varphi$ і практично мінімум втрат потужності в обмотках.

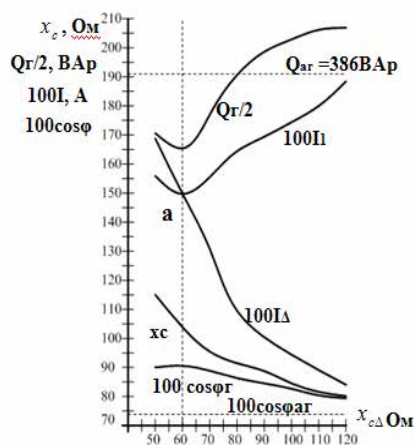


Рис. 1.2. Залежність струмів I_1 , I_Δ КААГ, опору x_c , $\cos\varphi_2$, споживання реактивної потужності Q_2 від опору $x_{c\Delta}$ при опорі навантаження $Z_H = \text{const}$ і напрузі $U_1 = 230$ В

Встановлено оптимальне співвідношення між опорами ємностей x_c і $x_{c\Delta}$ $x_c = 102$ Ом, $x_{c\Delta} = 60$ Ом не забезпечує необхідний режим запуску асинхронного двигуна при різкому зниженні вихідної напруги асинхронного генератора, але може бути засобом підвищення енергоефективності КААГ в усталеному робочому режимі. У зв'язку з цим, здійснюється форсування збудження, шляхом шунтування додаткової обмотки ємністю C_k (лише на час пуску) (рис. 1.3) [7].

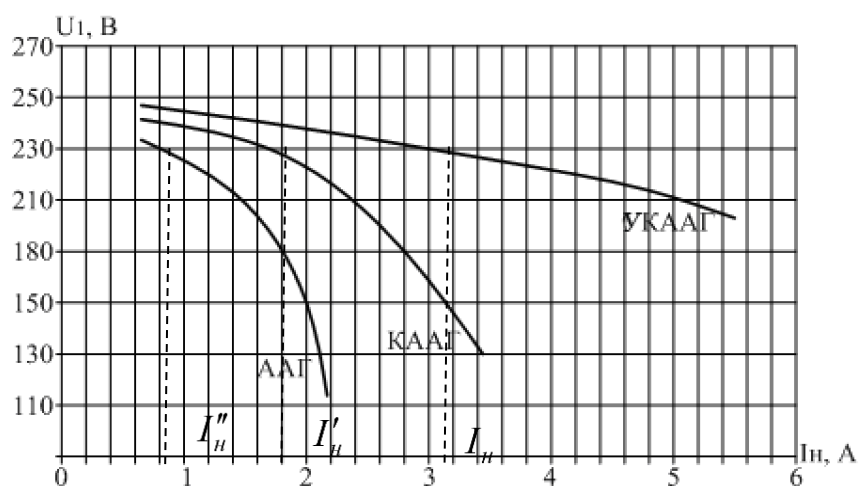


Рис. 1.3. Зовнішні характеристики автономних асинхронних генераторів на базі асинхронного двигуна 4А71В2: ААГ при $x_c = 100$ Ом, КААГ при $x_c = 100$ Ом, $x_{c\Delta} = 100$ Ом, УКААГ при $x_c = 100$ Ом, $x_{c\Delta} = 100$ Ом, $x_{ck} = 200$ Ом

1.2. Автономний асинхронний генератор зі змішаним ємнісним збудженням

1.2.1 Математичне моделювання автономного асинхронного генератора зі змішаним ємнісним збудженням

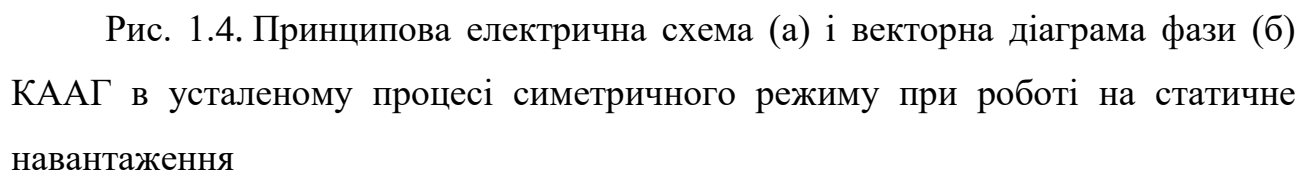
В компенсованому автономному асинхронному генераторі (КААГ) виконаному на базі трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненому роторі при парному $q = \frac{Z}{2pt}$ числі пазів на полюс $2p$ і фазу $t=3$, при пазовому кроці $\gamma = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z}$ фазну зону $q\gamma = 60^\circ$ обмотку статора ділять на дві рівні частини кожна з кутом $\Theta = 30^\circ$ між осями напівобмоток. В інших випадках напівобмотки виконують в двох окремих шарах пазів і зміщують їх між собою на будь-який кут, пропорційний пазовому кроку γ . Напівобмотки статора КАМ з'єднують по схемі поворотного АТ на електричну ємність C_Δ .

Одна з напівобмоток статора КААГ вмикається на повну робочу напругу U_1 генератора і є основною обмоткою (первинною обмоткою АТ), інша напівобмотка як вторинна для АТ і додаткова (компенсаційна) для КАГ, зміщена відносно основної на кут 30° за напрямом обертання поля[5,6].

Компенсований автономний асинхронний генератор (КААГ), як і звичайний ААГ, працює за принципом ємнісного самозбудження [4, 9].

При обертанні ротора від приводного двигуна потік залишкового магнетизму, перетинаючи обмотки статора, наводить в них малі залишкові ЕРС. Під їх дією в колі статора, замкненому на електричні ємності, виникають ємнісні струми, які збуджують генератор, збільшуючи його магнітний потік. Процес самозбудження продовжується до точки резонансу в коливальному контурі з еквівалентною індуктивністю L_e обмоток статора і ємністю C_e . Самозбудження відбувається як і в звичайному автономному асинхронному генераторі, але в КААГ, компенсуюча ємність поділена на дві частини – внутрішню C_Δ і

Електромагнітним шляхом активна енергія як і в ААГ передається з роторного кола в статорне з наступною передачею її на навантаження. Реактивна енергія від ємнісних джерел передається в статор для збудження генератора і на навантаження для компенсації реактивної потужності. По відношенню до напрямку перетворення енергії з механічної в електричну роторне коло – первинне, статорне – вторинне.



Для усталеного процесу симетричного режиму розрахункові рівняння електричної рівноваги контурів фази КААГ (рис. 1.4 а) представляються у вигляді [24–23, 35]:

$$\begin{aligned}
1. \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1 - jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_\Delta = \dot{I} Z ; \\
2. \dot{U}_1 &= \dot{U}_\Delta - \dot{U}_{c\Delta} = \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_\Delta - jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_1 + jx_{c\Delta} \dot{I}_\Delta ; \\
3. 0 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 ,
\end{aligned} \tag{1.1}$$

де $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -jx_m \dot{I}_0$ – ЕРС основної обмотки статора (E_1) і обмотки ротора ($\dot{E}_2 = \dot{E}_1$); $\dot{E}_\Delta = \dot{E}_1 e^{j\theta}$ – ЕРС додаткової обмотки статора, зміщеної відносно основної на кут 30° за напрямом обертання магнітного поля, тобто відстає по фазі в часі від основної ЕРС $\dot{E}_1$ на кут $\Theta = -30^\circ$ (рис. 1.6) [7, 11]. Напруги $\dot{U}_1$, $\dot{U}_\Delta$ на виході генераторних обмоток менші основних ЕРС на величину спаду напруги в обмотках $\dot{I}_1 Z_1$, $\dot{I}_\Delta Z_\Delta$, $jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_\Delta$, $jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_1$; де $z_1 = z_\Delta = r_1 + jx_1$ – власні внутрішні опори однакових за числом витків і перерізу проводу основної і додаткової обмоток статора; при поділі обмотки статора базової машини з внутрішнім опором $Z_{10} = R_{10} + jX_{10}$ [23] на дві паралельні вітки з меншим в два рази перерізом проводу, але з рівною кількістю числа витків W у базовій обмотці, активний опір паралельної вітки дорівнює $r_1 = 2R_{10}$, індуктивний опір віток залишається практично незмінним, $x_1 \approx X_{10}$, але при поділі базової обмотки на дві вітки, зміщених між собою на кут Θ , між ними зберігається частина поля розсіювання з опором $x_1 \cos \Theta$.

Для вихідних генераторних обмоток, з'єднаних по схемі поворотного АТ (рис. 1.6) на електричну ємність C_Δ зв'язок між напругами кін АТ приймається як $\dot{U}_1 = \dot{U}_\Delta - \dot{U}_{c\Delta}$. Напруга на виході АТ дорівнює $\dot{U}_{c\Delta} = \dot{U}_\Delta - \dot{U}_1$, а нехтуючи спадом напруги в обмотках, $\dot{U}_{c\Delta} \approx \dot{E}_\Delta - \dot{E}_1$.

Ємнісний струм на виході АТ $\dot{I}_\Delta = \frac{\dot{U}_{c\Delta}}{-jx_{c\Delta}}$ має активну і реактивну (ємнісну)

складову відносно загальної напруги $\dot{U}_1$ генератора.

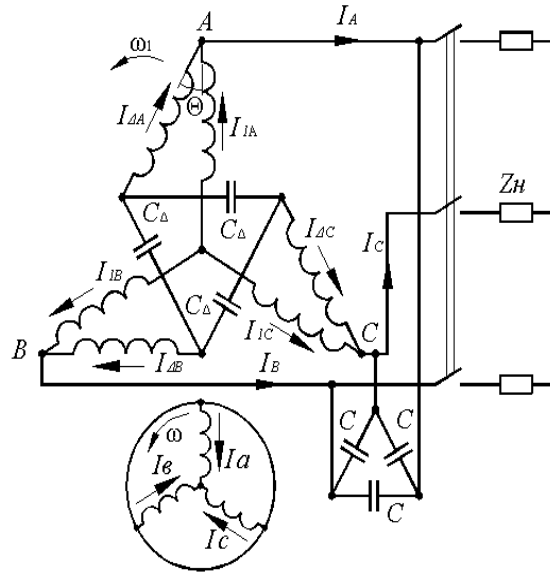


Рис. 1.6. Принципова електрична схема трифазного компенсованого автономного асинхронного генератора при роботі на статичне навантаження Z_H

Струм $\dot{I}_1$ основної обмотки статора (первинної обмотки АТ) зберігає головні властивості робочого струму АМ. Прямий електричний зв'язок між цими струмами АТ визначає загальний струм генератора $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$, який на виході генератора розподіляється на струм навантаження $\dot{I}_H = \frac{\dot{U}_1}{Z_H}$ і струм зовнішньої

ємності $\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_1}{-jX_C}$, тобто:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta = \dot{I}_H + \dot{I}_C. \quad (1.2)$$

Геометрична сума всіх струмів КАМ, приведені просторово до осі основної обмотки статора, визначає реактивний струм намагнічування[6].

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta} + \dot{I}_2, \quad (1.3)$$

де $\dot{I}_\Delta e^{-j\Theta}$ – струм додаткової обмотки статора; $\dot{I}_2$ – струм ротора, що приведений до осі основної обмотки статора.

Активні складові струмів кола статора і ротора при цьому взаємно урівноважені. Обґрунтовано, що на відміну від ААГ у КААГ струм намагнічування створюється не тільки індуктивними складовими струмів $\dot{I}_1$ та $\dot{I}_2$, але і ємнісним струмом $\dot{I}_\Delta$, приведеним у вигляді $\dot{I}_\Delta e^{-j\Theta}$ до осі основної

обмотки. У цьому проявляється підмагнічуюча дія ємнісного струму КАМ. Струм намагнічування $\dot{I}_0$ є струмом збудження машини, створює магнітний потік Φ , який в АГ індукує основні ЕРС всіх обмоток. Зв'язок між основною ЕРС E_1 обмотки статора і струмом намагнічування $\dot{I}_0$ встановлений кривою намагнічування АГ, а їх відношення визначає реактивний опір $x_m = \frac{E_1}{I_0}$ контуру намагнічування АГ, а їх відношення визначає реактивний опір $x_m = \frac{E_1}{I_0}$ контуру намагнічування (рис. 1.3); $x_{c\Delta} = \frac{1}{\omega C_\Delta}$ – опір ємності C_Δ . У КААГ розрахункові частоти струмів статора і ротора приймаються однаковими (їх різниця визначається величиною $f_1 = \frac{f}{1-S}$).

Визначивши напругу генератора як $\dot{U}_1 = \dot{I}Z$ через загальний струм $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$ і опір $Z = \frac{-jx_c Z_n}{Z_n - jx_c}$, де $Z_n = r_n + jx_n$ загальний опір навантаження, а $x_c = \frac{1}{\omega C}$ – опір шунтуючої ємності, систему рівнянь (1.1) замінено рівняннями зв'язків струмів $\dot{I}_1$ та $\dot{I}_\Delta$ статора з головним енергетичним параметром генератора – ЕРС $\dot{E}_1$ основної обмотки статора як:

$$\begin{aligned} 1. a\dot{E}_1 &= b\dot{I}_1 + c\dot{I}_\Delta, \\ 2. d\dot{E}_1 &= e\dot{I}_1 + f\dot{I}_\Delta \end{aligned} \quad (1.4)$$

Звідси струми: $\dot{I}_1 = \gamma\dot{E}_1, \dot{I}_\Delta = \Delta\dot{E}_1$, а параметричні коефіцієнти визначені як

$$\begin{aligned} a &= 1, \quad b = Z_1 + Z, \quad c = Z + jx_1 \cos\Theta, \\ d &= e^{j\Theta}, \quad e = Z + jx_1 \cos\Theta, \quad f = Z_1 + Z - jx_{c\Delta} \\ \gamma &= \frac{a \cdot f - c \cdot d}{b \cdot f - c \cdot e}; \quad \Delta = \frac{b \cdot d - a \cdot e}{b \cdot f - c \cdot e}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Умова рівноваги МРС або струмів (1.3) застосована для отримання основної ЕРС E_1 . Струми КААГ через основну ЕРС $\dot{E}_1$ визначені як:

$$\dot{I}_1 = \gamma\dot{E}_1, \quad \dot{I}_\Delta = \Delta\dot{E}_1, \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2} = \frac{\dot{E}_1}{Z_2}, \quad \dot{I}_0 = \frac{\dot{E}_1}{-jx_m}. \quad (1.6)$$

В (1.3) обидві сторони виразу скорочено на $\dot{E}_1$ і отримано рівняння рівноваги параметрів КААГ:

$$\gamma + \Delta \cdot e^{-j\Theta} = \frac{j}{x_m} - \frac{1}{r_2/S + jx_2}. \quad (1.7)$$

Комплекс $\gamma + \Delta e^{-j\Theta}$ представлено рівним $\alpha_a + j\alpha_i$, де α_a – дійсне число, α_i – уявне число цього комплексу і, відокремивши з (1.7) дійсну і уявну частини, отримано:

$$\alpha_a = -\frac{r_2/S}{\left(r_2/S\right)^2 + x_2^2}, \quad j\alpha_i = \frac{j}{x_m} + \frac{jx_2}{\left(r_2/S\right)^2 + x_2^2}, \quad (1.8)$$

звідки $\frac{r_2}{S} = \frac{-1 - \sqrt{1 - 4\alpha_a^2 x_2^2}}{2\alpha_a}$ і $S < 0$, а при підстановці знайденого значення

$\frac{r_2}{S}$ у другий вираз (1.8) отримано x_m .

Так при заданих величинах опору навантаження ($Z_n = Z_{нб} k_{нб}$; $k_n = 5 \dots 0,5$) власних (r_1, x_1, r_2, x_2) і внесених ($x_c, x_{c\Delta}$) параметрах генератора визначені відповідні їм змінні параметри S і x_m

По характеристиці намагнічування асинхронного генератора $E = f(I_0)$ і залежності $E = \varphi(x_m)$ (рис. 1.3) по x_m знайдено величину ЕРС $E = E_1$, що відповідає заданому режиму роботи генератора. При розрахунках і побудові векторних діаграм (рис.1.4 б) вектор $\dot{E}_1 = \dot{E}$ розташовано по осі дійсних чисел системи координат.

Для розрахунку характеристик КААГ в усталених режимах криву намагнічування (рис. 1.3) апроксимують неперервною функцією, наприклад, поліномом п'ятого ступеня $I_0 = a_1 E + b_1 E^3 + c_1 E^5$ або більш простим виразом зв'язку між E і x_m :

$$\frac{I_0}{E} = \frac{1}{x_m} = a_1 + b_1 E^2 + c_1 E^4, \quad (1.9)$$

де a_1, b_1, c_1 - коефіцієнти апроксимації в передбачуваній області зміни E на кривій рис. 1.3.

З отриманих ЕРС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$ і $\dot{E}_\Delta = \dot{E}_1 e^{j\theta_3}$ (1.6) знайдено всі струми КААГ, потім залежні від них електричні величини напруги, потужності.

1.2.2 Дослідження зовнішніх характеристик автономного асинхронного генератора зі змішаним ємнісним збудженням при статичному навантаженні

Розрахунки КААГ, виконаного на базі АД 4А71В2, представлено векторною діаграмою рис. 1.4 б, і графіками характеристик (рис. 1.2, 1.7). Векторна діаграма (рис. 1.4 б) ілюструє зв'язок між ЕРС, напругами і струмами КААГ. Ємність C на виході генератора виконує роль зовнішнього паралельно-ємнісного збуджувача і одночасно компенсатора реактивної потужності навантаження. Ємність C_Δ як навантажувальна для АТ, послідовно з'єднана з додатковою обмоткою статора, забезпечує збільшення внутрішнього збудження і перешкоджає розмагнічуванню генератора при навантаженні.

Моделювання зміни навантаження на виході КААГ здійснюється змінним опором $Z_n = k_n Z_{нб}$ при $\cos \varphi_n = \text{const}$, де $Z_{нб} = r_{нб} + jx_{нб}$ - базовий опір навантаження генератора за номінальної потужності. Для дослідження КААГ $Z_{нб} = 80 + j60 = 100e^{j\varphi_n}$ Ом при $\cos \varphi_n = 0,8$; k_n - коефіцієнт завантаження генератора. При розрахунках прийнято $k_n = 5-0,5$; номінальному навантаженню, відповідає $k_n = 1$.

З ростом навантаження генератора збільшується повний струм $\dot{I}_n = I_{на} - jI_{нр} = \frac{\dot{U}_1}{Z_n}$, а також активна $I_{на}$ і реактивна $jI_{нр}$ його складові. Це призводить до зростання активних складових струмів генератора як у роторі (I_{2a}) так і в статорі ($I_{1a}, I_{\Delta a}$). Зростає гальмівний момент генератора.

Навантаження генератора збільшує споживання реактивної потужності і потребує її частку від тієї ж ємності C . За рахунок зростання навантаження знижується виробіток реактивної потужності ємністю C , що призводить до зниження напруги $\dot{U}_1$ на виході КААГ і на ємності C . На векторній діаграмі (рис. 1.4 б) це зображено збільшенням вектора струму навантаження $\dot{I}_n = I_{na} + jI_{np} \sim \vec{0a} = \vec{ob} + j\vec{ab}$, відрізок $\vec{bc}$ графічно визначає частину ємнісного струму $\dot{I}_c \sim \vec{ac} = \vec{ab} + \vec{bc}$, що забезпечує збудження генератора, а вектор $\dot{I} = \dot{I}_n + \dot{I}_c = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$ загального струму генератора відповідно зменшений.

Реактивні складові струмів $\dot{I}_1$ та $\dot{I}_\Delta$ зустрічні у їх дії в часі. I_{1p} , як частина індуктивного струму збудження основної обмотки, потрапляє в неї у вигляді обміну з частиною $\vec{bc}$ ємнісного струму I_c і значно зменшується зі зростанням струму навантаження. Зменшується струм $\dot{I}_1$ і загальний струм $\dot{I}$ генератора (активні складові струмів збільшуються) (рис. 1.7) [6]. А активно-ємнісний струм $\dot{I}_\Delta$, що відображає ємнісне навантаження АТ, з ростом струму навантаження також збільшується (рис. 1.7). Це призводить до збільшення виробітку ємнісної потужності $Q_{c\Delta} = I_{\Delta}^2 x_{c\Delta}$, що підбуджує генератор, знижує його розмагнічування при навантаженні, збільшує ЕРС основної обмотки, перешкоджає зниженню напруги $\dot{U}_1$ на виході генератора.

Зовнішня характеристика КААГ у порівнянні з ААГ більш жорстка (рис. 1.3). Збільшується діапазон стійкої роботи генератора по струму навантаження. Збільшення ємнісного струму I_Δ при навантаженні КААГ призводить до безпосереднього росту $\cos\varphi$ генератора і подальшому збудженню його струмом $I_\Delta e^{-j\Theta}$ у складі струму намагнічування.

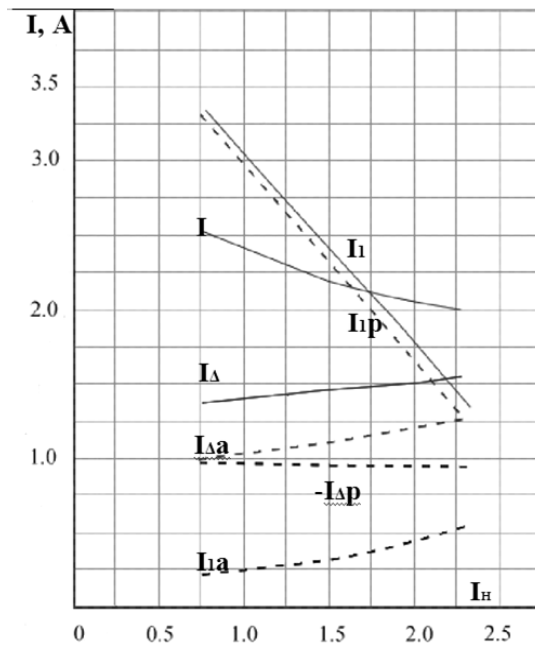


Рис. 1.7. Графіки залежності струмів КААГ від струму навантаження I_n при $Z_n = \text{var}$, $\cos \varphi = 0,8$, $x_c = 102 \text{ Ом}$, $x_{c\Delta} = 60 \text{ Ом}$

За показник рівня жорсткості зовнішньої характеристики можна прийняти відношенням $\frac{\Delta U_n}{I_n}$, тобто величиною зміни напруги генератора ($\Delta U_n = U_0 - U_n$) від холостого ходу (U_0) до номінального (U_n) до величини струму навантаження I_n за номінальної напруги. Для генераторів, виконаних на базі АД 4А71В2, з рис. 1.3 цей показник складає: для ААГ $\sim \frac{\Delta U_n''}{I_n''} = 10 \div 15 \text{ В/А}$; для КААГ $\sim \frac{\Delta U_n'}{I_n'} = (7 \div 10) \text{ В/А}$. Також для порівняння приведена і зовнішня характеристика УКААГ з показником, що складає $\frac{\Delta U_n}{I_n} = (5 \div 7) \text{ В/А}$.

Відповідно зниження напруги на виході генератора з ростом навантаження від холостого ходу до номінального в ААГ складає $\Delta U \% = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\% \geq 20 \%$, у КААГ $\Delta U \% = (10 \div 15)\%$. Хоча КААГ і забезпечує в $(1,5-2)$ рази більшу жорсткість зовнішніх характеристик у порівнянні з ААГ, але цього недостатньо для задоволення потреб щодо якості

електроенергії автономних електроустановок, де ААГ і КААГ не можуть працювати без спеціальних приладів регулювання і стабілізації напруги.

Розрахунок електричних величин КААГ, виконаного на базі АД 4А71В2, проведений в широкому діапазоні зміни ємнісних опорів $x_c = (80 \div 160)$ Ом зовнішньої ємності C і $x_{c\Delta} = (50 \div 120)$ Ом внутрішньої ємнісної компенсації. При цьому x_c прийнято величиною більшою 76 Ом, що в ААГ забезпечує напругу 230 В при номінальному базовому опорі $Z_{нб}$ навантаження. На рис. 1.7 приведені результати розрахунків у вигляді графіків залежності струмів КААГ від струму I_n навантаження при $x_c = 102$ Ом, $x_{c\Delta} = 60$ Ом, $Z_n = \text{var}$, $\cos \varphi_n = 0,8$, рис. 1.2 криві зміни деяких електричних величин в залежності від опору $x_{c\Delta}$ при $Z_{нб} = (80 + j60)$ Ом і напрузі $U_n = 230$ В. Встановлені співвідношення між опорами x_c і $x_{c\Delta}$, необхідні для забезпечення постійної по величині напруги U_1 генератора при постійному опорі Z_n навантаження. На рис. 1.2 приведена залежність $x_c = \psi(x_{c\Delta})$ при $U_n = 230$ В, $Z_{нб} = (80 + j60)$ Ом.

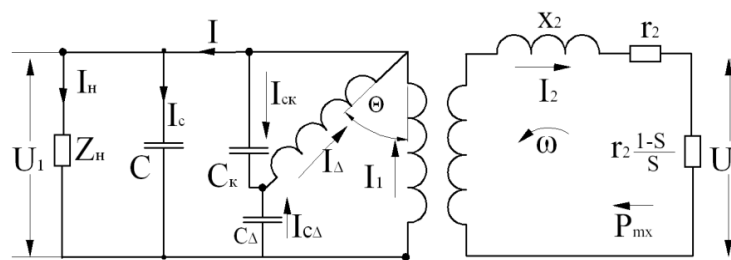
1.3. Автономний асинхронний генератор зі змішаним та додатковим ємнісним збудженням

1.3.1. Математичне моделювання роботи автономного асинхронного генератора зі змішаним та додатковим ємнісним збудженням

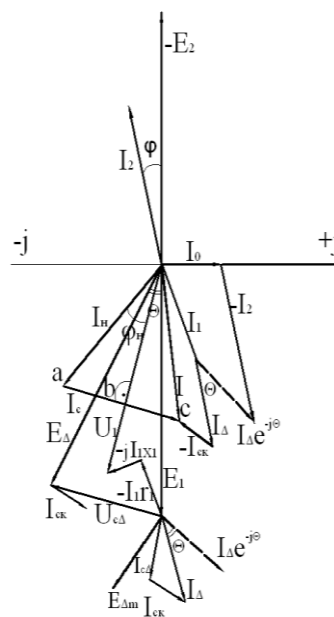
Незважаючи на очевидні значні переваги КААГ перед ААГ такі, як підвищення ступеня жорсткості зовнішніх характеристик, збільшення власного коефіцієнта потужності, зменшення реактивної потужності на збудження, регулюючі здатності у перерозподілі потужностей між вітками обмотки статора при зміні співвідношення між зовнішньою і внутрішньою ємностями, вищенаведені характеристики компенсованого автономного асинхронного генератора ще не повністю відповідають забезпеченню нормативних вимог до якості електроенергії в автономних електроустановках. Недостатня жорсткість зовнішніх характеристик, наявність ємності в одній із віток обмотки статора

зміщує фази струмів один відносно одного, що збільшує струми цих віток, але зменшує загальний струм генератора, що дещо збільшує втрати енергії в обмотках.

Поєднання зовнішньої і внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності є варіантом узагальнення способів компенсації в асинхронному генераторі. При цьому внутрішня компенсація проявляє свої властивості при суміщенні робочих обмоток статора АГ автотрансформаторною схемою з'єднання на електричну ємність C_{Δ} .



а



б

Рис. 1.8. Принципова електрична схема фази УКААГ з додатковим ємнісним підмагнічуванням – а; векторна діаграма – б

При цьому між обмотками АТ, крім прямого електричного зв'язку, зберігається і трансформаторний зв'язок, що застосовується для додаткової

внутрішньої ємнісної компенсації. Для цього вторинна обмотка АТ, трансформаторним зв'язком з первинною обмоткою, шунтується електричною ємністю C_k (рис. 1.8 а). Ємнісний струм $\dot{I}_{ck}$ випереджає напругу $\dot{U}_\Delta$ додаткової

$$\text{обмотки АГ або її ЕРС } \dot{E}_\Delta \approx \dot{U}_\Delta \text{ на } 90^\circ, \text{ у вигляді } \dot{I}_{ck} = \frac{\dot{U}_\Delta}{-jx_{ck}} \approx \frac{\dot{E}_\Delta}{-jx_{ck}} \quad (\text{рис. 1.8 б}).$$

Струм $\dot{I}_{ck}$, замикаючись по контуру вторинної обмотки і ємності C_k , збільшує струм $\dot{I}_\Delta = \dot{I}_{c\Delta} + \dot{I}_{ck}$ і змінює його фазу, що призводить до збільшення струму намагнічування $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{j\Theta} + \dot{I}_2$, додаткової ЕРС $\dot{E}_{\Delta m} = -jx_m \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta}$ у складі основної ЕРС $\dot{E}_1 = -jx_m \dot{I}_0$ і напруги $\dot{U}_1$ генератора. При незмінному(статичному) режимі навантаження генератора (рис. 1.8 б) ($\dot{U}_H = \text{const}$, $Z_{H0} = \text{const}$, $\dot{I}_2 \approx \text{const}$ як у КААГ) зближуються між собою фази струмів $\dot{I}_\Delta = \dot{I}_{c\Delta} + \dot{I}_{ck}$ і $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 - \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta}$, зміщуються в бік активних складових (відносно $\dot{E} \approx \dot{U}_1$), що впливає на підвищення енергоефективності генератора (де $\dot{I}_{c\Delta} = \frac{\dot{U}_{c\Delta}}{-jx_{c\Delta}}$ — струм внутрішньої ємнісної компенсації на виході поворотного АТ, ввімкненого на ємність C_Δ при напрузі $\dot{U}_{c\Delta} \approx \dot{E}_\Delta - \dot{E}_1$) аналогічно КААГ.

В КААГ при відсутності ємності C_k — $\dot{I}_{c\Delta} = \dot{I}_\Delta$, (рис.1.7), а при шунтуванні додаткової обмотки статора ємністю C_δ струм $\dot{I}_{c\Delta}$ ємності C_Δ і додаткової обмотки відрізняються один від одного, причому $\dot{I}_\Delta = \dot{I}_{c\Delta} + \dot{I}_{ck}$.

Математична модель фази в усталеному симетричному режимі компенсованого автономного асинхронного генератора з зовнішньою і подвійною ємнісною компенсацією представлена узагальненою з поєднанням всіх способів ємнісної компенсації $x_c \neq 0$, $x_{c\Delta} \neq 0$, $x_{ck} \neq 0$. При $x_{ck} = \infty$, $x_c \neq 0$, $x_{c\Delta} \neq 0$ — це математична модель для розрахунку характеристик КААГ, а при $x_{ck} = \infty$, $x_{c\Delta} = 0$, $\Theta = 0$ — базового варіанту ААГ.

Розрахункові рівняння фази УКААГ при роботі на статичне навантаження в усталеному процесі симетричного режиму по схемі (рис. 1.8 а) представляються системою [7, 23–24]:

$$\begin{aligned} 1) \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 z_1 - jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_\Delta = \dot{I} \cdot Z \\ 2) \dot{U}_1 &= \dot{U}_\Delta - \dot{U}_{c\Delta} = \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta z_\Delta - jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_1 + jx_{c\Delta} \cdot \dot{I}_{c\Delta} \\ 3) \dot{U}_\Delta &= \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta z_\Delta - jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_1 = -jx_{ck} \cdot \dot{I}_{ck}; \\ 4) 0 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2. \end{aligned} \quad (1.10)$$

У рівняннях системи (1.10) задано параметри схеми заміщення (рис. 1.8 а): власні як постійні параметри базової асинхронної машини r_1 , x_1 , r_2 , x_2 , окрім змінного x_m – опору контуру намагнічування, внесені параметри – ємнісні опори x_c , $x_{c\Delta}$, x_{ck} і опір навантаження $Z_H = k_H Z_{H0}$ при $Z_{H0} = r_{H0} + jx_{H0} = 80 + j60 = 100e^{j\varphi}$ Ом, $Z_H = \text{var}$ при змінному коефіцієнті завантаження $k_H = 5-0,5$ опір основної і додаткової обмоток статора прийнятий однаковим $z_1 = r_1 + jx_1 = z_\Delta$.

Попередньо задана швидкість ω обертання ротора і приводного двигуна, яка визначає частоту ЕРС і струмів генератора на холостому ході.

Для розрахунку x_m і залежної від нього величини основної ЕРС E_1 генератора приводиться типова крива намагнічування $E = f(I_0)$ і відповідна їй крива залежності $E = \varphi(x_m)$ базової асинхронної машини. E_1 , як основний енергетичний фактор генератора, визначається першим із невідомих електричних величин, потім знаходяться залежні від E_1 струми, напруги на виході генератора і на окремих ділянках його схеми. Розрахунок УКААГ (рис. 1.8 а), що еквівалентно приведений до нерухомого, проводиться в робочому режимі, для якого справедливі співвідношення:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{E}_2 = -jx_m \dot{I}_0; \quad \dot{E}_\Delta = \dot{E}_1 e^{j\Theta}; \quad \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta} + \dot{I}_2; \\ \dot{I}_2 &= \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_2}; \quad \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta - \dot{I}_{ck} = \frac{\dot{U}_1}{Z} = \dot{I}_H + \dot{I}_c; \quad \dot{I}_H = \frac{\dot{U}_1}{Z_H}; \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_1}{-jx_c}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{ck} = \frac{\dot{U}_{\Delta}}{-jx_{ck}}; \dot{I}_{\Delta} = \dot{I}_{c\Delta} + \dot{I}_{ck}; \dot{I}_{c\Delta} = \frac{\dot{U}_{c\Delta}}{-jx_{c\Delta}}; Z = \frac{-jx_c Z_H}{Z_H - jx_c}. \quad (1.11)$$

З урахуванням співвідношень (1.11) система (1.10) перетворюється до двох рівнянь зв'язку між струмами $\dot{I}_1$ і $\dot{I}_{\Delta}$ обмоток статора і основної ЕРС $\dot{E}_1$ генератора:

$$\begin{aligned} 1. a\dot{E}_1 &= b\dot{I}_1 + c\dot{I}_{\Delta}, \\ 2. d\dot{E}_1 &= e\dot{I}_1 + f\dot{I}_{\Delta}, \end{aligned} \quad (1.12)$$

де параметричні коефіцієнти представлені у вигляді як:

$$\begin{aligned} a &= 1 + k_z e^{j\theta}; \quad b = z_1 + Z + k_z jx_1 \cos\Theta; \quad c = z_1 k_z + Z + jx_1 \cos\Theta; \\ d &= (k_c + k_z) e^{j\theta}; \quad e = Z + (k_c + k_z) jx_1 \cos\Theta; \quad f = (k_c + k_z) z_1 + Z - jx_{c\Delta}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Розв'язання системи (1.12) визначає струми статора як $\dot{I}_1 = \gamma \dot{E}_1$, $\dot{I}_{\Delta} = \Delta \cdot \dot{E}_1$ при:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{af - cd}{bf - ce} = \frac{(k_c + k_z)(z_1 - jx_1 \cos\Theta e^{j\theta}) + Z(1 - e^{j\theta}) - jx_{c\Delta}}{G}, \\ \Delta &= \frac{bd - ae}{bf - ce} = \frac{(k_c + k_z)(z_1 e^{j\theta} - jx_1 \cos\Theta) + Z(k_c e^{j\theta} - 1)}{G}, \\ G &= bf - ce = [(k_c + k_z)(z_1 + jx_1 \cos\Theta) + Z(k_c + 1)](z_1 - jx_1 \cos\Theta) - \\ &\quad - jx_{c\Delta}(Z_1 + Z + k_z jx_1 \cos\Theta), \\ k_c &= 1 + \frac{x_{c\Delta}}{x_{ck}}, \quad k_z = \frac{jZ}{x_{ck}}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Параметричні коефіцієнти УКААГ приведені в узагальненому вигляді для системи способів ємнісної компенсації, яка включає зовнішню і подвійну внутрішню. Вирази (1.12, 1.13) можуть бути використані і для часткових варіантів ємнісної компенсації.

Так для КААГ при $x_{ck} = \infty$, $k_c = 1$, $k_z = 0$ ці коефіцієнти матимуть вигляд (1.5) зокрема:

$$\gamma = \frac{z_1 - jx_1 \cos\Theta \cdot e^{j\theta} + Z(1 - e^{j\theta}) - jx_{c\Delta}}{G};$$

$$\Delta = \frac{z_1 e^{j\Theta} - jx_1 \cos\Theta + Z(e^{j\Theta} - 1)}{G};$$

$$G = (z_1 + jx_1 \cos\Theta + 2Z)(z_1 - jx_1 \cos\Theta) - jx_{c\Delta}(z_1 + Z), \quad (1.15)$$

для базового ААГ з двома паралельними співосьовими вітками в обмотці статора при $\Theta = 0$, $x_{ck} = \infty$, $x_{c\Delta} = 0$, $k_c = 1$, $k_z = 0$, $x_c \neq 0$,

$$\gamma = \Delta = \frac{1}{z_1 + jx_1 + 2Z} = \frac{1}{2(Z_{10} + Z)}, \quad (1.16)$$

$$\text{при } \dot{I}_1 = \dot{I}_\Delta = \frac{\dot{I}}{2} = \gamma \dot{E}_1 = \Delta \dot{E}_1.$$

Визначення в подальшому опору x_m контуру намагнічування, ковзання S генератора і основної ЕРС $\dot{E}_1$ відбувається за єдиною методикою для всіх асинхронних генераторів з різними способами ємнісної компенсації реактивної потужності. Методика ґрунтується на використанні кривої намагнічування асинхронної машини і рівняння рівноваги параметрів прийнятого на базі рівняння рівноваги МРС або струмів, представленого у загальному вигляді $\sum \dot{I} = \dot{I}_0$, а для КААГ як $\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2$.

В УКААГ всі основні струми пропорційні основній ЕРС $\dot{E}_1$ і дорівнюють $\dot{I}_1 = \gamma \dot{E}_1$, $\dot{I}_\Delta = \Delta \dot{E}_1$, $\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2} = \frac{\dot{E}_1}{Z_2}$ при $Z_2 = \frac{r_2}{S} + jx_2$ і $S < 0$, $\dot{I}_0 = \frac{\dot{E}_1}{-jx_m}$. Підставивши ці значення в рівняння рівноваги струмів і скоротивши обидві його частини на $\dot{E}_1$, отримаємо рівняння рівноваги параметрів генератора:

$$\gamma + \Delta e^{-j\Theta} = \frac{j}{x_m} - \frac{1}{\frac{r_2}{S} + jx_2} = \frac{j}{x_m} - \frac{1}{z_2}. \quad (1.17)$$

Представимо комплекс $\gamma + \Delta e^{-j\Theta} = \alpha_a + j\alpha_i$ у вигляді суми дійсного числа α_a і уявного $j\alpha_i$, виділимо з (1.17) дійсну (активну) і уявну (реактивну) частини:

$$\alpha_a = -\frac{r_2/S}{(r_2/S)^2 + x_2^2}, \quad \alpha_i = \frac{1}{x_m} + \frac{x_2}{(r_2/S)^2 + x_2^2} \quad (1.18)$$

Представивши перший із виразів (1.18) у вигляді квадратичного рівняння відносно r_2/S , визначимо його як:

$$r_2/S = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - 4\alpha_a^2 x_2^2}}{2\alpha_a} < 0 \text{ і } S < 0 \quad (1.19)$$

В УКААГ ковзання $S < 0$ є шуканою величиною і залежить від електричного навантаження на виході генератора і його параметрів. З умови рівноваги власних параметрів, внесених – ємностях і навантаженні (Z_n) з (1.18) визначається ковзання S генератора, а при підстановці знайденого значення r_2/S в (1.18) знаходиться x_m , що відповідає режиму навантаження генератора і його параметрів:

$$x_m = \frac{(r_2/S)^2 + x_2^2}{\alpha_i[(r_2/S)^2 + x_2^2] - x_2} \quad (1.20)$$

З кривої намагнічування (рис. 1.4) або її апроксимованого виразу (1.9) знаходять величину основної ЕРС $\dot{E}_1 = E_1$, що відповідає розрахунковому значенню x_m , потім визначають струми та інші електричні величини, залежні від ЕРС $\dot{E}_1$. Для зручності розрахунків вектор ЕРС $\dot{E}_1$ на векторній діаграмі розміщують по осі дійсних чисел (рис. 1.8 б), де $\dot{E}_1 = E_1$. При цьому відмітимо, що прийнята раніше методика розрахунку параметрів S , x_m і характеристик КААГ, є частковим варіантом представленої методики розрахунку характеристик узагальненого компенсованого автономного асинхронного генератора.

1.3.2. Дослідження зовнішніх характеристик автономного асинхронного генератора зі змішаним та додатковим ємнісним збудженням при накиді навантаження

Особливий інтерес складають зовнішні характеристики асинхронних генераторів (рис. 1.9) [23, 24].

Встановлено, що зі зростанням навантаження ААГ (змодельовано зменшення Z_n при $\cos \varphi_n = \text{const}$ і $x_c = \text{const}$) збільшуються як активна так і реактивна складові його струму. Це вимагає збільшення ємнісного струму

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_1}{-jx_c}$$

на компенсацію реактивного навантаження і знижує струм збудження

генератора. ААГ розмагнічується, зменшуються його ЕРС $\dot{E}_1$ і напруга $\dot{U}_1$, що призводить до зниження струму I_c і подальшому розмагнічуванню машини. Отримані зовнішні характеристики ААГ круто падаючі, м'які (рис. 1.9 а). Для досягнення номінальних напруги і струму навантаження (для даного прикладу) необхідна ємність C величиною у 42 мкФ (малий опір $x_c \approx 76$ Ом в ААГ).

Наявність ємності C_Δ в одній із робочих віток КААГ зі зростанням навантаження приводить до збільшення струму $\dot{I}_\Delta$ і зниження розмагнічування магнітопроводу. Побудовані зовнішні характеристики – жорсткіші (рис. 1.9 б), зменшується величина зовнішньої ємності C ($x_c \approx 102$ Ом), необхідна для досягнення номінальних значень напруги та струму.

У КААГ із зростанням навантаження збільшуються активні складові струмів обох віток обмотки статора. Зростання реактивної складової струму навантаження, як і в ААГ, потребує збільшення ємнісного струму I_c на її компенсацію, що зменшує частину реактивного струму основної обмотки статора на збудження генератора. Проте наявність ємності C_Δ в додатковій обмотці зі зростанням активної складової призводить до збільшення ємнісного струму $\dot{I}_\Delta$, що впливає на збільшення виробітку реактивної потужності

$Q_{c\Delta} = I_{\Delta}^2 \cdot x_{c\Delta}$ ємністю C_{Δ} , а це знижує (в порівнянні з ААГ) розмагнічування генератора із зростанням навантаження і призводить до підвищення ступеня жорсткості зовнішніх характеристик (рис. 1.9 б).

Для отримання номінальних напруги $\dot{U}_H = 230V$ і струму $I_H = 2,3A$ при номінальному опорі $Z_H = (80 + j60)$ Ом навантаження при $x_{c\Delta} \neq 0$ потрібна менша, ніж в ААГ, зовнішня ємність C (більший опір $x_c > 76$ Ом). Але за рахунок ємності C_{Δ} в колі додаткової обмотки статора струми $\dot{I}_1$ і $\dot{I}_{\Delta}$ віток різні за величиною і за фазою. Лише при $x_c = 102$ Ом, $x_{c\Delta} = 60$ Ом вони рівні за величиною, але значно зсунуті між собою по фазі, що збільшує їх при створенні загального струму $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_{\Delta}$ і впливає на зниження ефективності КААГ.

Хоча за рахунок підмагнічуючої дії ємнісного струму витрата реактивної потужності Q_0 на збудження генератора в цій точці нижче, ніж при такому самому навантаженні в ААГ, а з урахуванням втрат $\sum Q_p$ на створення поля розсіювання повна реактивна потужність генератора $Q_c = Q_0 + \sum Q_p$ в ААГ становить 385 ВАр, а в КААГ ≈ 330 ВАр (на 15 % менше, ніж в ААГ).

Поєднання зовнішньої C і подвійної (C_{Δ} , C_k) внутрішньої ємнісної компенсації в УКААГ ефективно впливає на перерозподіл струмів, потужностей обмоток, істотно підвищується вихідна напруга.

Шунтування ємністю C_k додаткової обмотки статора, трансформаторно з'єднаною, як з первинною, основною обмоткою підсилює величину і змінює фазу струму $\dot{I}_{\Delta} = \dot{I}_{c\Delta} + \dot{I}_{ck}$ додаткової обмотки. Зростає додаткова ЕРС $\dot{E}_{\Delta m} = -jx_m \dot{I}_{\Delta} e^{-j\Theta}$ в складі основної ЕРС $\dot{E}_1 = -jx_m (\dot{I}_1 + \dot{I}_{\Delta} e^{-j\Theta} + \dot{I}_2) = -jx_m \dot{I}_0$, що збільшує напругу $\dot{U}_1$ генератора.

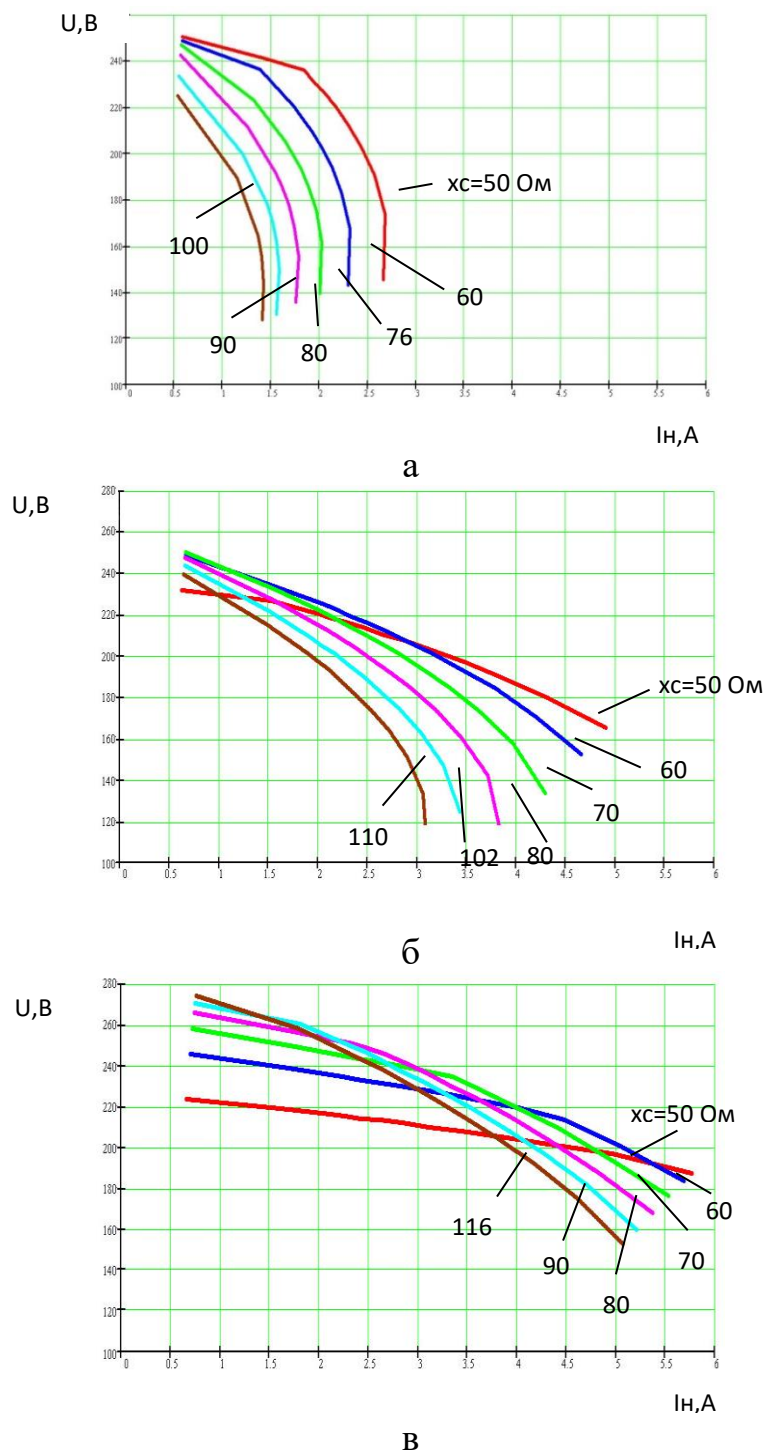


Рис. 1.9. Зовнішні характеристики автономних асинхронних генераторів:
а – на базі серійного асинхронного двигуна (ААГ), б – компенсованого асинхронного генератора (КААГ) ($x_{c\Delta}=60$) зі змішаним ємнісним збудженням;
в – узагальненого компенсованого асинхронного генератора (УКААГ) з додатковим збудженням ($x_{c\Delta}=100$ Ом, $x_{ck}=300$ Ом).

Зі збільшенням навантаження напруга зменшується в допустимих для експлуатації межах (зменшуючись від холостого ходу до номінального не більше, ніж на 5 %). При цьому із збільшенням ємнісного опору x_c для компенсованих генераторів ($x_c > 76$ Ом) зменшується величина напруги холостого ходу при незмінній номінальній напрузі $\dot{U}_f = 230$ В. У додатку В практично при однакових напругах ($U_1 \approx 230$ В з відхиленнями не більше $\pm 0,5$ %) і опорі навантаження $Z_f = (80 + j60) \hat{\Omega} = const$ наведені порівняльні розрахункові дані генераторів, виконаних на базі АД 4А71В2, з різними способами ємнісної компенсації реактивної потужності: ААГ, КААГ, УКААГ.

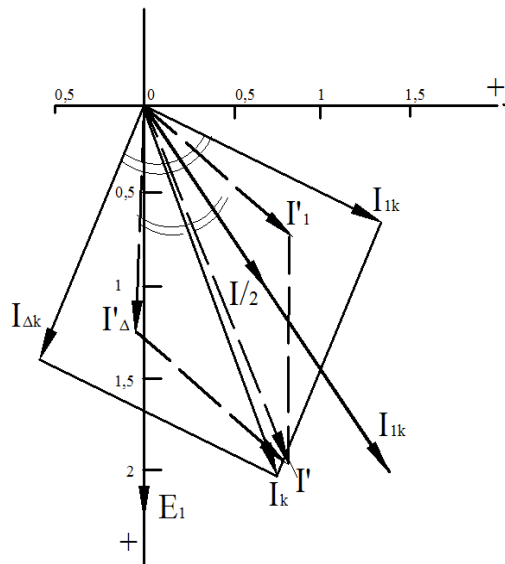


Рис. 1.10. Фрагмент порівняння векторних діаграм струмів статора ААГ ($\dot{I}$, $\dot{I}/2$), КААГ ($\dot{I}_{1k}$, $\dot{I}_{\Delta k}$, $\dot{I}_k = \dot{I}_{1k} + \dot{I}_{\Delta k}$), УКААГ ($\dot{I}'_1$, $\dot{I}'_{\Delta}$, $\dot{I}' = \dot{I}'_1 + \dot{I}'_{\Delta}$) при $\dot{U}_H = 230 \text{ В}$, $Z_H = (80 + j60) \text{ Ом}$

Встановлено, що в КААГ при незмінному навантаженні за рахунок підмагнічуючої дії струму I_{Δ} внутрішньої ємнісної компенсації зменшується величина індуктивного струму намагнічування I_0 , що незважаючи на зростання опору x_m контуру намагнічування, призводить до зниження споживання

генератором реактивної потужності $Q_0 = I_0^2 x_m$ (витрачається на створення основного магнітного потоку) і в цілому до зниження реактивної потужності $Q_\Sigma = Q_0 + \sum Q_p$ з врахуванням потужності $\sum Q_p$ на створення поля розсіювання. Власний коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ КААГ перевищує величину 0,9 (порівняно з $\cos \varphi_{ААГ} = 0,745$), досягаючи 0,96 в УКААГ.

Струм $\dot{I}_\Delta$ додаткової обмотки зміщений за рахунок струму $\dot{I}_{ck}$ по фазі, а електромагнітний зв'язок з основною обмоткою зближує між собою по фазі струми $\dot{I}_1$ і $\dot{I}_\Delta$, наближаючи їх до активних (рис. 1.10) [23] відносно напруги $\dot{U}_1$ ($E_1 \approx U_1$). Це впливає на підвищення ефективності генератора, зменшуючи величини струмів I_1 , I_Δ при створенні загального струму $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$, підвищує $\cos \varphi$ генератора, знижує втрати потужності в обмотках.

Напруги U_Δ додаткової обмотки і $\dot{U}_1$ основної обмотки (з однаковими числами витків) близькі одна до одної по величині і до вихідної напруги генератора. Тому для значної зміни величини і фази струму $\dot{I}_\Delta$ за рахунок впливу струмом $\dot{I}_{ck}$ потрібна відносно мала ємність C_k (великий опір ємності $x_{ck} = \frac{1}{\omega_0 C_k}$). Це дає змогу регулювати напругу U_1 УКААГ зміною малої ємності, форсувати напругу при роботі УКААГ на різко змінюване навантаження, а також при потужності споживача, сумірної з потужністю генератора.

Отже, для отримання характеристик симетричного режиму сталого процесу різних модифікацій автономних асинхронних генераторів можна здійснити за узагальненою моделлю у вигляді єдиного алгоритму з наступною послідовністю виконання розрахунків (розрахунки виконують для приведенного нерухомого генератора еквівалентного обертовому за постійної швидкості обертання вала приводного двигуна та заданій базовій частоті змінного струму на виході генератора) [23, 24]:

представляють схему заміщення автономного асинхронного генератора з урахуванням його модифікації. За узагальнену схему приймається схема УКААГ

з додатковим ємнісним збудженням (підмагнічуванням), що охоплює три варіанти ємнісного збудження: за допомогою основної ємності C , включеної паралельно навантаженню на виході генератора; ємності $\tilde{N}_{\Delta}$ – на виході поворотного АТ або у коло додаткової обмотки; ємності C_k , включеної паралельно додатковій обмотці. Таким чином отримуємо автономний асинхронний генератор зі змішаним ємнісним збудженням.

Окремими випадками такого генератора є:

- класичний або базовий ААГ з однією обмоткою статора з включеної паралельно їй ємністю C ;
- компенсований ААГ зі змішаним збудженням з паралельною ємністю C на виході генератора і додатковою C_{Δ} у колі додаткової обмотки КААГ;
- КААГ з додатковою ємністю C_k , що шунтує додаткову обмотку;
- КААГ при відсутності паралельної ємності, $C = 0$.

Можуть бути запропоновані і інші модифікації автономних асинхронних генераторів з паралельним чи змішаним ємнісним збудженням.

Задаються величиною і характером навантаження на виході генератора у вигляді опору $Z_n = r_n + jx_n$, величиною паралельної ємності C і визначають їх єдиний опір Z на виході генератора. Залежно від схеми і модифікації генератора задаються також величинами додаткових ємностей C_{Δ} і C_k , величиною і знаком кута Θ .

Записують розрахункові рівняння електричної рівноваги кіл статора і ротора однієї фази, які потім представляють відносно ЕРС $\dot{E}_1$ основної обмотки статора.

Всі струми генератора ($\dot{I}_1, \dot{I}_{\Delta}, \dot{I}_2, \dot{I}_0$) визначають через основну ЕРС $\dot{E}_1$ і параметри відповідного кола. При побудові векторної діаграми вектор $\dot{E}_1$ розміщують по осі дійсних чисел комплексної площини для того, щоб дійсні і уявні частини комплексів струмів збігалися відповідно з їх активними і реактивними складовими. З рівняння рівноваги МРС і струмів

$\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2$, і при скороченні обох частин на $\dot{E}_1$ отримують рівняння рівноваги параметрів системи. Виділивши з цього рівняння окремо рівняння балансу дійсних і уявних частин комплексів параметрів, з першого рівняння визначають $\frac{r_2}{S}$ і S , з другого x_m , що відповідають заданому навантаженню і ємності.

У класичному ААГ з однією обмоткою і ємністю у колі статора струм I_Δ відсутній, тобто $I_\Delta = 0$.

За x_m з кривої намагнічування асинхронної машини знаходять основну ЕРС $\dot{E}_1$, струми, напруги, потужності, момент генератора.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНОГО АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ З КОМПЕНСОВАНИМИ МАШИНАМИ

2.1. Експериментальна установка для дослідження асинхронного електромеханічного комплексу з компенсованими машинами

Експериментальні дослідження АЕК, що складається з компенсованого асинхронного генератора та асинхронного електродвигуна сумірної потужності, проведені з метою вивчення якісної картини дії фізичних процесів компенсованих асинхронних машинах, отримання фактичних кількісних показників на реальній фізичній моделі, перевірки раніше отриманих результатів обчислювальних експериментів та підтвердження позитивних особливостей перед базовими машинами.

В автономному електромеханічному комплексі в якості приводного двигуна (ПД) для компенсованого асинхронного генератора застосований двигун постійного струму незалежного збудження типу П41 з можливістю широкого і плавного регулювання швидкості. (рис. 2.1). У досліді компенсований асинхронний генератор КАГ (будь-якої модифікації за способом компенсації реактивної потужності і забезпеченню нею самого генератора) створений на основі базового асинхронного електродвигуна з короткозамкнутим ротором 4А71В2 номінальною потужністю 1,1 кВт. При цьому, фаза обмотки статора генератора складається із двох однакових за числом витків паралельних напівобмоток, просторово зміщених у пазах сердечника одна відносно одної на кут $\Theta = -30^\circ$ з електричною ємністю C_Δ у розсічці однієї з них. Шунтування ємністю C_k додаткової напівобмотки КААГ дозволяє здійснювати форсування ємнісного збудження під час пуску робочого двигуна сумірної потужності. В якості електромеханічного навантаження використаний серійний асинхронний двигун 4А71А2 номінальною потужністю 0,75 кВт. Навантаженням робочого

двигуна є навантажувальний генератор НГ з балансірною машиною для контролю і реєстрації моменту навантаження двигуна в усталеному режимі.

Для порівняльної оцінки КААГ з базовою асинхронною машиною достатньо провести часткові випробування, що характеризують її основні властивості і особливості.

Випробувальний стенд лабораторної установки (рис. 2.1) містить наступне за призначенням електрообладнання (табл. 2.1, 2.2) [23]:

приводним (ПД) для досліджуваної у режимі генератора машини є двигун постійного струму типу П 41 номінальною потужністю 3,2 кВт з частотою обертання $n_n = 1500$ об/хв. Двигун з'єднаний з валом досліджуваного генератора через клинопасову передачу з передаточним числом рівним 2;

асинхронний генератор виконаний на базі асинхронного двигуна типу 4А71В2 потужністю 1,1 кВт;

вал асинхронного двигуна жорстко з'єднаний з валом навантажувального генератора (НГ) постійного струму типу П21 номінальною потужністю 1,5 кВт (частота обертання $n_n = 3000$ об/хв) за допомогою муфти. Навантажувальний генератор є елементом балансірної машини, станина статора якого виконана на двох стоякових підшипниках вала і може повертатися. Кут повороту станини здійснюється за рахунок навантаження (реостатом R_n) і обмежений стальними пружинами з боків. Стрілка на станині вказує на кут повороту залежно від величини гальмового моменту НГ. Момент M на валу досліджуваного двигуна дорівнює сумі гальмового моменту M_g генератора і моменту ΔM на подолання втрат у ньому. Незалежне збудження обмотки статора генератора балансірної машини забезпечується від мережі постійного струму;

асинхронний двигун застосований у якості активно-індуктивного навантаження генератора;

батареї електричних конденсаторів КБГ-МН на робочу напругу 400 і 600 В ємністю до 250 мкФ на фазу дозволяють регулювання ємності через 2 мкФ, магазин теплових елементів і реостатів;

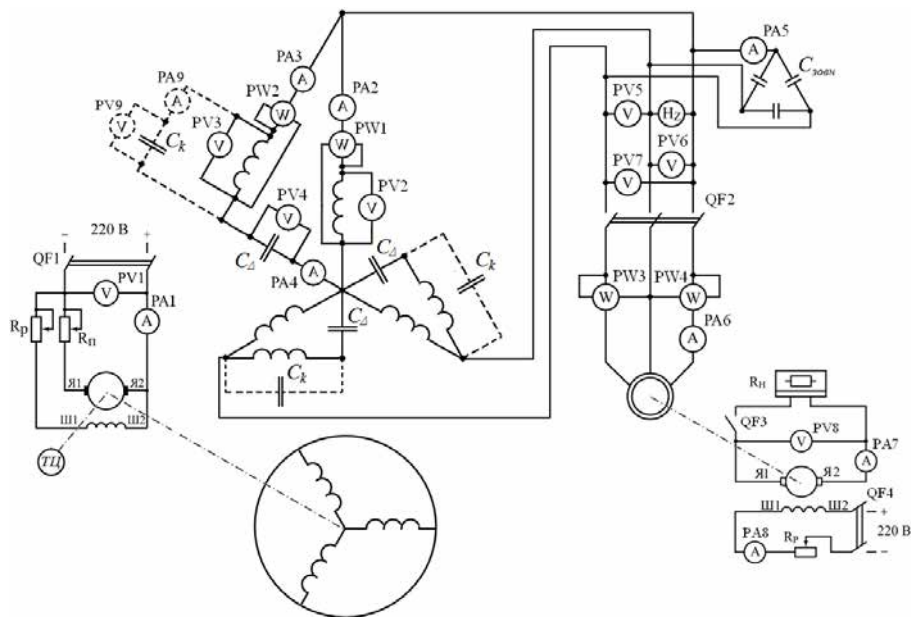


Рис. 2.1. Електрична схема лабораторної дослідної установки

вимірювальні засоби представлені електровимірювальними комплектами К505, К506, набором амперметрів (Э 538, 539), вольтметрів (Э 545), ватметрів, трансформаторів струму (И54 М), цифровим тахометром (ТЦ - 3М до 8000 об/хв);

для запису форми кривих напруги і струму статора генератора і двигуна використано осцилограф Metrix – 3252 з відповідним програмним забезпеченням та модулем гальванічної розв'язки SDI – AIU – 4U.

Таблиця 2.1

Перелік та технічні дані електрообладнання, що використовувалося при проведенні досліджень

№ п/п	Назва обладнання та приладів	Тип	Номінальна потужність, кВт
1	2	3	4
1	Компенсований автономний асинхронний генератор на базі серійного асинхронного електродвигуна	4А71В2	1,1

Продовження таблиця 2.1

1	2	3	4
2	Електродвигун асинхронний	4А71А2	0,75
3	Приводний двигун постійного струму з балансирною машиною	П41У4	3,2
4	Генератор постійного струму	П21	1,5
5	Тахометр цифровий	ТЦ – 3М 0..8000 об/хв	
6	Осцилограф	Metrix-3252	
7	Модуль гальванічної розв'язки	SDI – АІU – 4U	
8	Батарея електричних конденсаторів з	КБГ-МН 400...600 В	

Таблиця 2.2

Перелік та технічні дані електровимірювальних приладів, що використовувались при проведенні досліджень

№ п/п	Назва приладу	Тип	Межі вимірювання	Клас точності	Заводський номер	Рік випуску	Дата повірки
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Вольтметр	Э545	0...600 В	0,5	7009	1991	2012
2	Вольтметр	Э545	0...600 В	0,5	7450	1991	2012
3	Вольтметр	Э545	0...600 В	0,5	7060	1991	2012
4	Вольтметр	Э545	0...600 В	0,5	7221	1991	2012
5	Вольтметр	Э545	0...600 В	0,5	7714	1991	2012
6	Вольтметр	Э545	0...600 В	0,5	7442	1991	2012
7	Вольтметр	Э545	0...600 В	0,5	7414	1991	2012
8	Вольтметр	Э545	0...200 В	1,5,	378304	1983	2012
9	Амперметр	Э538	0...2,5...5 А	0,5	5346	1991	2012
10	Амперметр	Э538	0...2,5...5 А	0,5	4825	1991	2012

1	2	3	4	5	6	7	8
11	Амперметр	Э538	0...2,5...5 А	0,5	4843	1991	2012
12	Амперметр	Э538	0...2,5...5 А	0,5	4648	1991	2012
13	Амперметр	Э539	0...5...10 А	0,5	2994	1991	2012
14	Амперметр	Э539	0...5...10 А	0,5	3441	1983	2012
15	Амперметр	Э514	0...2,5...5 А	0,5	14281	1983	2012
16	Амперметр	Э539	0...5...10 А	0,5	5320	1983	2012
17	Ваттметр	Д5004	1...2,5...5 А 30...600 В	0,5	94716	1983	2012
18	Ваттметр	Д5065	1...2,5...5 А 30...600 В	0,5	847678	1983	2012
19	Ваттметр	Д5004	1...2,5...5 А 30...600 В	0,5	94716	1983	2012
20	Комплект вимірювальний	К505	0...10 А 0...600 В	-	3161	1983	2012

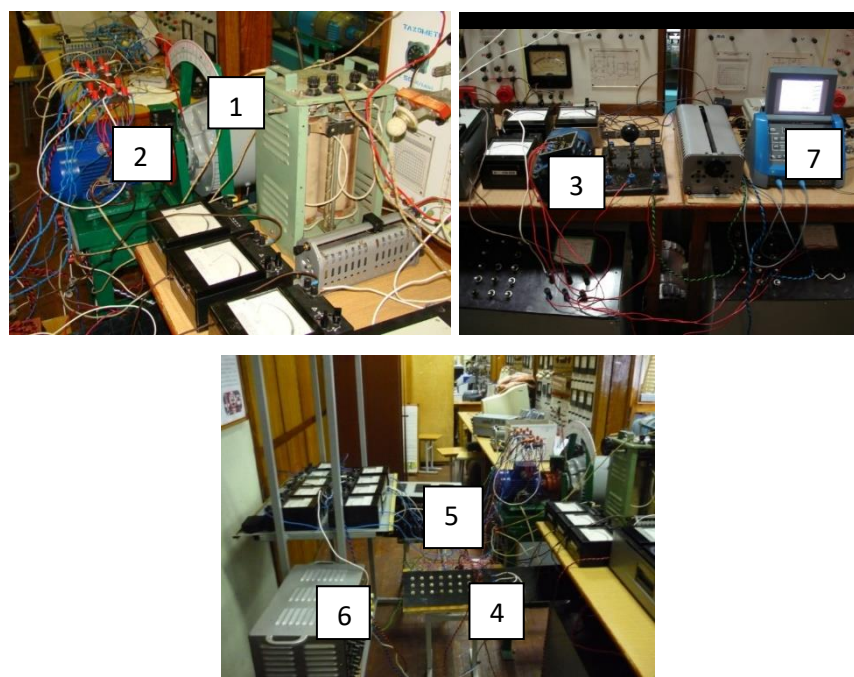


Рис. 2.2 Загальний вигляд експериментальної установки автономного електромеханічного комплексу з компенсованим асинхронним генератором та серійним асинхронним двигуном: 1 – приводний двигун, 2 – асинхронний

генератор, 3 – асинхронний двигун, 4, 5, 6 – батареї електричних конденсаторів, 7 – осцилограф

2.2. Методика експериментальних досліджень асинхронного електромеханічного комплексу

Дослідження електричних машин передбачають зняття характеристик холостого ходу, короткого замикання, робочих, пускових, теплових та вібро-акустичних [25].

Відмітимо деякі основні особливості характеристик КАМ у складі автономного електромеханічного комплексу.

Характеристика холостого ходу (х. х) асинхронних машин як залежність струму I_0 обмотки статора від напруги U знімається при відсутності навантаження - механічного на валу двигуна або електричного на виході генератора при постійній швидкості обертання ротора. При холостому ході у режимі двигуна швидкість обертання ротора знижується за рахунок механічних втрат, тобто стає меншою за швидкість обертання магнітного поля статора. Струм ротора, втрати потужності в обмотках ротора і сталі сердечника наближаються до 0. Струм холостого ходу I_0 в обмотці статора визначає реактивну складову намагнічуючого струму I_μ та активну I_{0a} , що покриває втрати потужності). При малій напрузі ($0,1 \cdot U_n$ у режимі х. х) складно зберегти швидкість обертання ротора постійною. При цьому характеристика холостого ходу $U = f(I_0)$ відрізняється від типової кривої намагнічування $E = \varphi(I_\mu)$ асинхронної машини.

У досліді ідеального х. х приводний двигун розганяє ротор досліджуваної АМ зі швидкістю, що дорівнює швидкості обертання магнітного поля. При цьому ЕРС обмотки ротора і струм дорівнюють нулю, відповідно втрати потужності в обмотці і сталі осердя ротора будуть відсутніми. Механічні і додаткові втрати потужності покриває привідний двигун. Тому струм обмотки

статора I_0 у цьому випадку є мінімальним і наближеним до струму намагнічування I_μ , що створює основне магнітне поле, $I_0 \approx I_\mu$. Тільки невелика втрата напруги в обмотці статора $\Delta \dot{U}_0 = I_0(R_{10} + jX_{10})$ і втрати потужності $I_0^2(R_{10} + jX_{10})$ відрізняють напругу $\dot{U} = -\dot{E} + \dot{I}_0(R_{10} + jX_{10})$ від основної ЕРС і створюють кут зсуву фаз між $\dot{U}$ та $\dot{I}_0$ близький до 90° . За необхідністю при заданих $U = \dot{U}$, R_{10} , X_{10} , виміряному струмі I_0 і втратах потужності $P_0 = I_0 \cdot U \cdot \cos \varphi_0$ можливо уточнювати величину основної ЕРС E . При ідеальному х. х асинхронної машини $E = U$, характеристика х. х $U = f(I_0)$ наближена до характеристики кривої намагнічування $E = \varphi(I_\mu)$, бо струм холостого ходу практично дорівнює намагнічуючому, $I_0 \approx I_\mu$. Така крива намагнічення справедлива як для базової АМ, так і для всіх її модифікацій незалежно від схеми обмотки статора. Вона визначає магнітний стан машини за рахунок одного з основних параметрів реактивного опору $x_m = \frac{E_0}{I_0}$ намагнічуючого контуру. При ЕРС, що дорівнює номінальній напрузі $E_{0n} = U_n$, опір $x_{m0} = \frac{E_{0n}}{I_{0n}}$ є основним розрахунковим для машини. При вираженні кривої намагнічування у в. о. x'_{m0} , E'_{0n} , I'_{0n} приймаються за 1, а в інших точках кривої $x'_m = \frac{x_m}{x_{m0}}$, $E' = \frac{E}{E_{0n}}$, $I'_0 = \frac{I_0}{I_{0n}}$.

Наявність двох паралельних обмоток статора з ємністю в одній з них приводить до появи коливального контуру $L - C$ у компенсованій асинхронній машині. Відбувається обмін енергією між індуктивністю L і ємністю C навіть при х. х. На відміну від серійної АМ з однією обмоткою статора це змінює загальний реактивний струм машини по відношенню до загальної напруги і характеристику х. х. Для КАМ справедлива крива намагнічування, що використовується при розрахунку характеристик КАМ застосовуючи дані з дослідів ідеального х. х. базової АМ. Аналогічно для КАМ може бути прийнята і

характеристика короткого замикання базової АМ. Тому в КАМ доцільно знімати експериментальні робочі характеристики методом безпосереднього навантаження.

Приводний двигун з'єднаний з валом досліджуваного асинхронного генератора (АГ) клинопасовою передачею з коефіцієнтом передачі 2, що розвиває на валу частоту обертання від 150 до 3600 об/хв. Для роботи у режимі автономного асинхронного генератора (для забезпечення робочої частоти $f_1 \approx 50$ Гц і при роботі на загальну мережу з частотою 50 Гц) частота обертання валу генератора повинна бути $n \geq 3000$ об/хв. Частота струмів f_1 в статорі і f_2 у роторі зв'язані між собою співвідношенням $f_1 = \frac{f_2}{1-S}$, де $S = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} < 0$ – ковзання генератора, $\omega = \omega_2 = \frac{\pi n}{30}$ (c^{-1}) – швидкість обертання ротора, $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$ – швидкість обертання магнітного поля статора.

Приводний двигун забезпечує роботу генератора, у режимі безпосереднього навантаження на загальну мережу, а в автономному режимі на власне навантаження.

При роботі генератора на електричну мережу безпосередньо чи по схемі робоча напруга і частота задані (фіксовані) мережею. Активне навантаження регулюють моментом і швидкістю обертання приводного двигуна. Механічна швидкість ротора, частота, ЕРС і струм задаються приводним двигуном більшими швидкості обертання електромагнітного поля статора і його частоти, $\omega_2 > \omega_1$, $f_2 > f_1$, $S < 0$. Робочі характеристики такого генератора по графічному зображенню подібні робочим характеристикам асинхронного двигуна, але при однаковому еквівалентному навантаженні. К.к.д і $\cos \varphi$ генератора менші, а струм статора більший, ніж у двигуна. Це пояснюється тим, що у двигуні ЕРС обмотки статора E_1 менша U , а в генераторі $E_1 > U$ і на її створення $E_1 = -jx_m \dot{I}_0$ необхідний більший реактивний намагнічуючий струм I_0 і реактивна потужність при однаковій активній потужності.

При включенні компенсованого асинхронного генератора для роботи на загальну мережу врахована зміна знака кута Θ між основною і додатковою обмотками статора (рис. 2.3). Для цього заздалегідь виконано переключення ємності C_{Δ} в обмотках статора. При цьому, в автономних електроустановках асинхронний генератор призначений для забезпечення електроенергією статичних (у вигляді електричних опорів) і динамічних (наприклад, електродвигунів) споживачів.

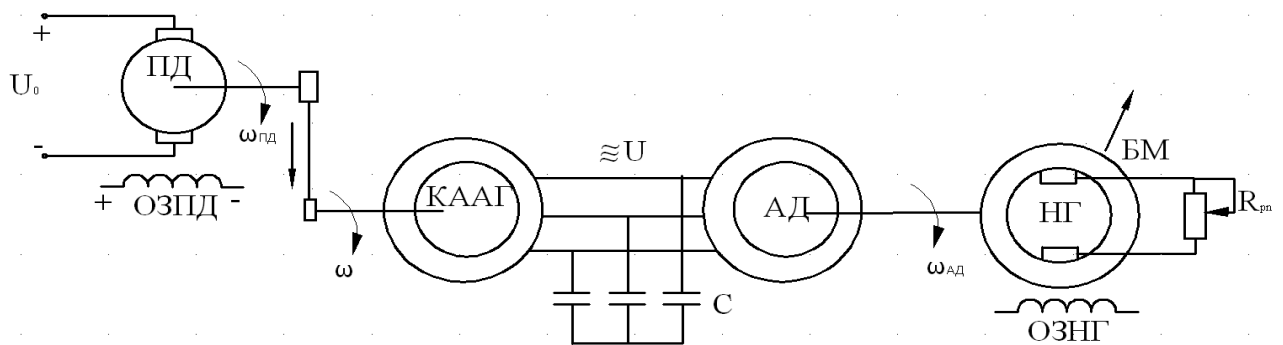


Рис. 2.3. Схема включення електричних машин у досліджуваному електромеханічному комплексі з асинхронними машинами різної модифікації: ПД – привідний двигун, ОЗПД – обмотка збудження привідного двигуна, КААГ – компенсований автономний асинхронний генератор, АД – асинхронний двигун, НГ та БМ – відповідно навантажувальний генератор та балансірна машина, ОЗНГ – обмотка збудження навантажувального генератора, С – батарея конденсаторів, R_{pn} – регулювальний реостат

Для контролю швидкості привідного двигуна використовується цифровий тахометр. Контроль і реєстрація процесів, що протікають під час роботи автономного електромеханічного комплексу здійснюється за допомогою осцилографа (зняття кривих напруг і струмів генератора, побудови зовнішніх характеристик типу рис. 2.4).

2.3. Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

Тарована крива к. к. д. і механічної характеристики приводного двигуна, тахометр на його валу дозволяють визначити момент, швидкість на валу генератора при роботі на навантаження. Вимірювання всіх електричних величин (напруг, струмів, потужності, частоти) у вітках обмотки статора у загальному колі і фазі компенсованого асинхронного генератора з фіксованими і різними величинами ємностей зовнішніх (C, x_c), внутрішньої ($C_{\Delta}, x_{c\Delta}$) і додаткової внутрішньої (C_k, x_{ck}) компенсації дали можливість експериментально зняти робочі характеристики генератора у досліді з безпосереднім навантаженням (рис. 2.4 – 2.6) Повну інформацію про підвищення енергоефективності компенсованих автономних асинхронних генераторів відображено зовнішніми характеристики (залежність напруги генератора від струму навантаження, $U = f(I_n)$ при змінному опорі навантаження, $Z_n = \text{var}, \cos \varphi_n = \text{const}, \omega = \text{const}$) і різноманітних постійних ємностях та їх співвідношеннях.

Отримані експериментальним шляхом зовнішні характеристики автономного асинхронного генератора з зовнішньою ємнісною компенсацією (ААГ), внутрішньою (КААГ) ємнісною компенсацією та додатковою внутрішньою ємнісною компенсацією (УКААГ) порівнювались з розрахунковими (див. рис. 1.4). Відхилення розрахункових і експериментальних даних встановлювалось з урахуванням абсолютної і відносної похибок і наведені нижче.

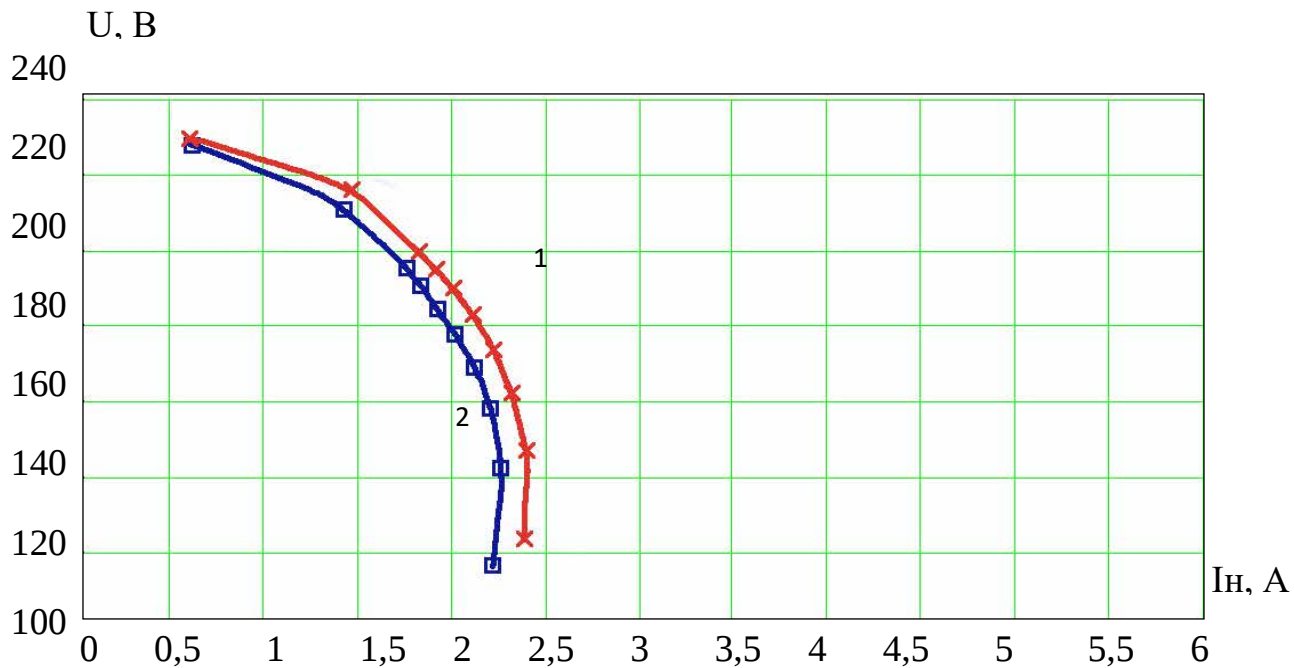


Рис. 2.4. Зовнішня характеристика ААГ з зовнішньою ємнісною компенсацією при $x_c = 76 \text{ Ом}$; 1 – розрахункові дані, 2 – експериментальні дані

Таблиця 2.3

Аналіз даних отриманих розрахунковим і експериментальним шляхом ААГ з зовнішньою ємнісною компенсацією

№п/п	I, А	$U_{екс}$, В	$U_{роз}$, В	$ \Delta U $, В	$(\Delta U/U_{екс}) \cdot 100$, %
1	0,58	230	230	0,0	0
2	1,40	216	218	3,0	1,37
3	1,75	198	200	2,0	0,90
4	1,83	195	197	2,0	1,03
5	1,92	182	190	8,0	2,70
6	2,05	179	182	3,0	1,11
7	2,16	168	175	8,0	2,94
8	2,27	159	162	3,0	1,88
9	2,28	142	148	6,0	3,52
10	2,30	118	122	4,0	3,39
Середнє значення				2,2	1,88
$\Delta U_{макс}$				5,0	3,52

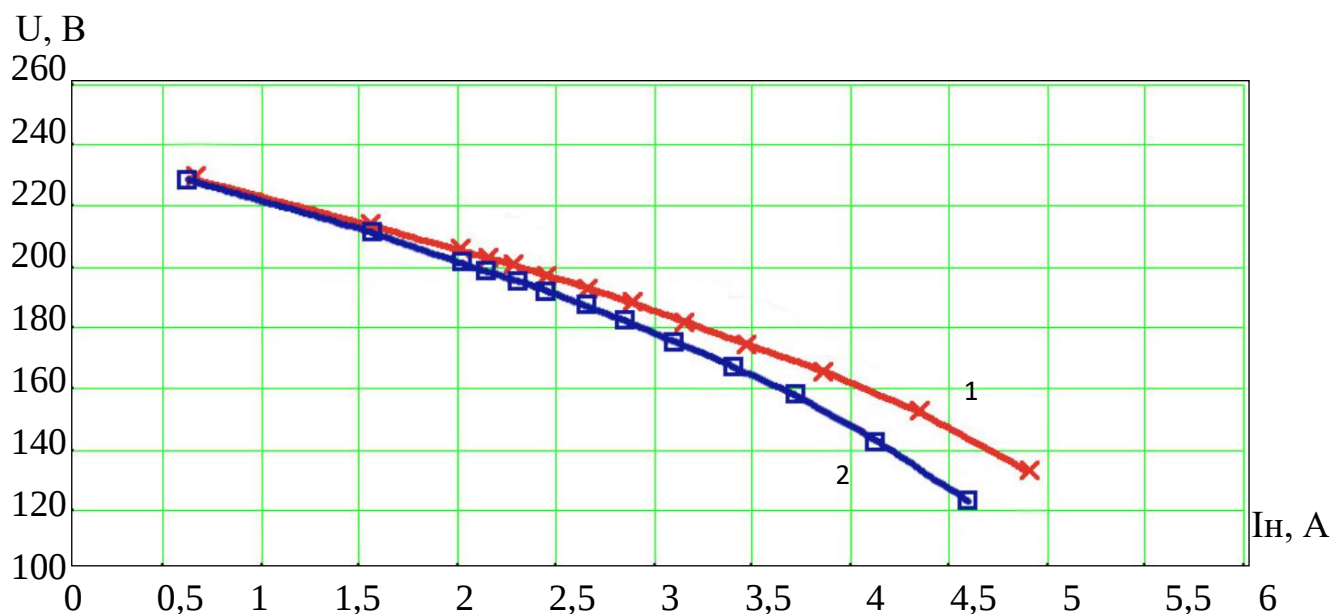


Рис. 2.5. Зовнішня характеристика КААГ зі змішаною ємнісною компенсацією при $x_c = 102$ Ом, $x_{с\Delta} = 60$ Ом, $k = 5 \dots 0.75$: 1 – розрахункові дані, 2 – експериментальні дані

Таблиця 2.4

**Аналіз даних отриманих розрахунковим і експериментальним шляхом
КААГ з зовнішньою та внутрішньою ємнісною компенсацією**

№ п/п	I, А	$U_{екс}$, В	$U_{роз}$, В	$ \Delta U $, В	$(\Delta U/U_{екс}) \cdot 100$, %
1	0,65	233	231	2,0	0,85
2	1,54	219	218	1,0	0,45
3	1,98	204	205	1,0	0,49
4	2,11	202	201	1,0	0,49
5	2,24	200	200	0,5	0,25
6	2,40	199	198	1,0	0,50
7	2,50	197	197	0,0	0,00
8	2,80	183	183	0,0	0,00
9	3,10	180	180	0,0	0,00
10	3,50	173	177	4,0	2,30
11	3,80	161	162	1,0	0,62
12	4,40	140	149	9,0	6,42
13	4,90	130	140	10,0	7,70
Середнє значення				2,3	1,54
$\Delta U_{макс}$				10	6,42

U, В

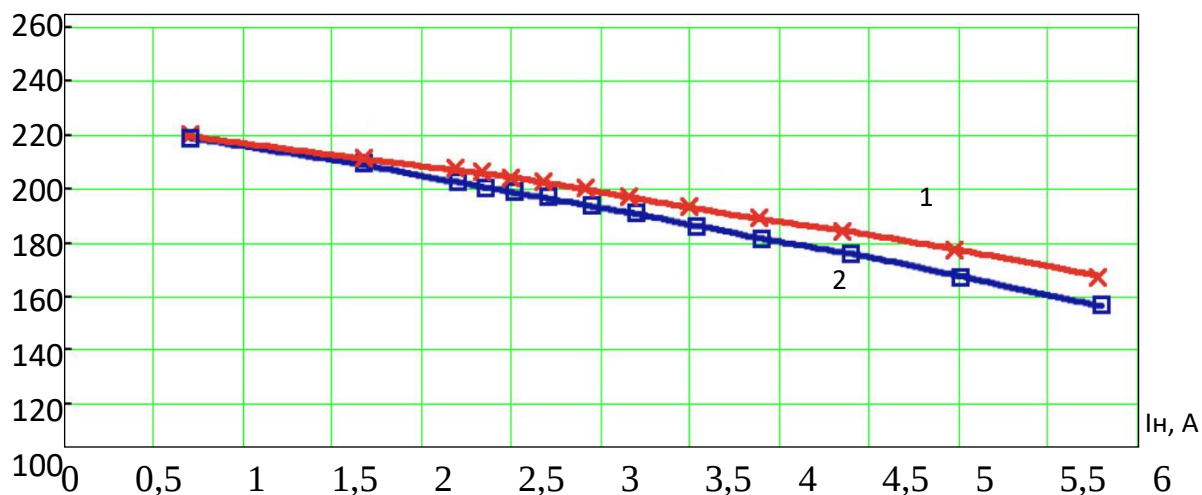


Рис. 2.6. Зовнішня характеристика УКААГ зі змішаною та додатковою ємнісною компенсацією при $x_c = 116$ Ом, $x_{c\Delta} = 100$ Ом, $x_{ck} = 500$ Ом, $k = 5 \dots 0.75$
:1 – розрахункові дані, 2 – експериментальні дані

Таблиця 2.5

**Аналіз даних отриманих розрахунковим і експериментальним шляхом
УКААГ з зовнішньою та подвійною внутрішньою ємнісною
компенсацією**

№П/П	I, А	$U_{екс}$, В	$U_{роз}$, В	$ \Delta U $, В	$(\Delta U/U_{екс}) \cdot 100$, %
1	0,70	225	220	5	2,20
2	1,60	220	215	5	2,30
3	2,18	217	210	3	1,38
4	2,40	210	205	5	2,38
5	2,50	213	205	8	3,75
6	2,70	210	202	8	3,80
7	2,85	203	200	3	1,47
8	3,10	200	197	3	1,50
9	3,50	198	193	5	2,52
10	3,90	190	185	5	2,63
11	4,40	185	182	3	1,62
12	5,00	180	179	1	0,55
13	5,70	170	169	1	0,58
Середнє значення				4	2,05
$\Delta U_{макс}$				8	3,75

Зовнішні характеристики, що зняті розрахунковим і експериментальним шляхом мають різну ступінь жорсткості за рахунок величини та схеми включення компенсуючої ємності (рис. 2.4 – 2.6).

Встановлено, що для компенсації реактивної складової навантаження ААГ(виконаний на базі АД 4А71В2) (рис. 2.4) і забезпечення номінального режиму роботи при якому $\dot{U}_н = 230В$, $I_н = 2,3А$ величина опору ємності x_c складає 76 Ом.

Для КААГ оптимальні величини опорів ємностей обмоток статора складає при $x_c = 102$ Ом, $x_{с\Delta} = 60$ Ом. За таких умов струми I_1 і I_{Δ} додаткової обмотки статора рівні і мають однаковий тепловий стан. Наявність ємності C_{Δ} в одній з

обмоток КААГ зі зростанням навантаження приводить до збільшення цього струму I_{Δ} і зниження розмагнічування магнітопроводу. Зовнішні характеристики стають більш жорсткими (рис. 2.5), зменшується величина зовнішньої ємності C , необхідна для досягнення номінальних значень напруги та струму.

В УКААГ застосована подвійна внутрішня ємнісна компенсація для форсування ємнісного збудження у випадку накиду навантаження. Визначено, що для запуску АД від УКААГ необхідно застосувати такі співвідношення ємностей $x_c=116$ Ом, $x_{c\Delta}=100$ Ом, $x_{ck}=500$ Ом. Застосування ємності C_k підсилює величину і змінює фазу струму основної обмотки генератора I_{Δ} . Збільшення струму активно підвищує на жорсткість зовнішньої характеристики УКААГ (рис. 2.6).

Порівняльний аналіз даних з зовнішніх характеристик, що отримані розрахунковим та експериментальним шляхом (рис.2.4 – 2.6, таб.2.3 – 2.5) показав, що максимальне відхилення напруги між ними у ААГ $\Delta U_{\max}$ склало – 5 В (3,52 %), у КААГ $\Delta U_{\max}$ – 10 В (6,42 %), у УКААГ $\Delta U_{\max}$ – 8 В (3,75 %).

3. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИБОРІВ ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

3.1. Загальні положення

Сила і інтенсивність впливу електричного струму залежить від значення струму і показника часу його протікання крізь людський організм.

Поразка електричним струмом може стати причиною:

- дискомфортих відчуттів;
- непритомності;
- опіків різного ступеня;
- судом;
- задухи;
- і навіть летального результату;

Саме тому робота з електрообладнанням граничної акуратності.

Прийнятним вважається струм показником 0,5 мА, адже при значенні струму вже 10-15мА людина вже не зможе самостійно провести розрив електричного кола, в якій знаходиться. При показниках струму 50мА відбувається ураження дихальної та серцево-судинної системи, а при 100мА може відбутися зупинка серця і таке значення вважається смертельним. Тим не менш, в залежності від різних факторів струм може впливати на різних людей різний вплив.

Можна виділити такі причини отримання електротравм:

- ненавмисне торкання струмоведучих ділянок, які знаходяться під напругою (всякого роду проводу без ізоляції, контакти, шини тощо)
- виникнення напруги на тих ділянках, де воно не повинно бути
- присутність напруги на тих ділянках електричного обладнання, які відключені від мережі (з-за помилкового підключення, наведеної напруги від сусіднього обладнання)
- поява напруги на поверхні землі внаслідок замикання кабелю з землею, порушення справності пристроїв заземлення та ін.

В якості запобіжних заходів необхідно

- точно дотримуватися правил устрою електричних установок (ПУЕ)
- правил техніки безпеки (ПТБ)
- правил технічної експлуатації (ПТЕ).

Проведення робіт на електроустановках різного типу можливе лише кваліфікованими фахівцями, які пройшли навчання і мають підтверджують посвідчення.

У разі попадання людини в замкнутий контур електричний струм зазвичай протікає або від ноги до руки, або від однієї руки до іншої.

Саме тому заборонено:

- Включати рубильники без дозволу лаборанта або викладача.
- Подавати напругу на робочий прилад, схему без попередньої перевірки та дозволу лаборанта.
- Проводити переключення та зміну лічильників без виключення напруги.
- Залишати без нагляду експериментальну установку під напругою.
- Працювати на незаземленому обладнанні.

У деяких ситуаціях при замиканні фази на корпусі і відключення захисту напруги оболонки по відношенню до землі буде вище допустимого показника напруги дотику. Напруга дотику виникає в організмі людини у разі дотику двох ділянок, які проводять струм. Збільшується таке напруження у міру видалення від ділянки заземлення і за лінією області розтікання струму буде дорівнювати показникам напруги на оболонці обладнання по відношенню до землі.

Перед включенням електроприладу необхідно візуально перевірити електрошнур на наявність механічних порушень. Електроприлади повинні бути надійно заземлені згідно з правилами улаштування приладу. Забороняється працювати з електроприладами вологими руками. Не залишати електроприлад без нагляду на довгий час, після закінчення роботи перевірити, чи всі прилади вимкнені. При виявленні або виникненні несправності в електроприладі негайно

викликати електрика, що обслуговує прилад. Категорично заборонено виконувати будь-які ремонтні роботи самостійно.

Рятування життя людини, ураженої струмом, у багатьох випадках залежить від швидкості і правильності дій осіб, що здійснюють допомогу. Передусім потрібно якнайшвидше звільнити потерпілого від дії електричного струму. Якщо неможливо відключити електричне обладнання від мережі, потрібно відразу приступити до звільнення потерпілого від струмопровідних частин, не доторкаючись при цьому до потерпілого.

Заходи долікарської допомоги після звільнення потерпілого залежать від його стану, її потрібно надавати негайно, по можливості на місці події, одночасно викликавши медичну допомогу. Якщо потерпілий не знепритомнів, потрібно забезпечити йому на деякий час спокій, не дозволяючи рухатись до прибуття лікаря. Якщо потерпілий дихає рідко і судорожно, але прослуховується пульс, потрібно негайно зробити йому штучне дихання. При відсутності дихання, розширення зіниць і посиніння шкіри потрібно робити штучне дихання і непрямий масаж серця.

Надавати допомогу необхідно до прибуття лікаря, оскільки є багато випадків, коли штучне дихання і масаж серця повертали потерпілих до життя.

У лабораторії необхідно бути дуже обережним. З метою попередження травматизму необхідно знати будову машин і механізмів і суворо дотримуватись правил експлуатації техніки та інструментів, техніки безпеки.

Проведення інструктажу та перевірка знань з питань охорони праці проводиться викладачем в межах навчальної програми і оформляється у відповідних журналах реєстрації інструктажів.

Приступати до роботи без інструктажу на робочому місці у лабораторії забороняється.

Виконувати тільки ту роботу, яка доручена завідувачем лабораторії, викладачем якщо це не заперечує правилам техніки безпеки і не приведе до нещасного випадку.

У випадку травмування, хвороби слід припинити роботу, повідомити завідуючого лабораторії та звернутися до медпункту.

При переведенні на іншу роботу, навіть тимчасову, слід пройти інструктаж з техніки безпеки для цього іншого виду роботи.

3.2 Вимоги безпеки перед початком роботи

Працівник перед початком роботи повинен:

- одягнути та привести до ладу передбачений для виконання роботи спецодяг, спецвзуття та ЗІЗ;
- оглянути і привести в належний стан робоче місце, прибрати зайві матеріали;
- провести зовнішній огляд електрообладнання, яке буде використовуватися в роботі, переконатися, що всі кожухи, кришки пристроїв закриті, відсутні видимі пошкодження ізоляції проводів, штепсельних вилок тощо;
- перевірити справність роботи вимикача;
- перевірити наявність і справність заземлення електрообладнання.

Перед підключенням електрообладнання до електричної мережі, необхідно перевірити, чи відповідає напруга, вказана на табличці (щитку), напрузі мережі. Невідповідність напруги може призвести до виходу з ладу електрообладнання чи спричинити електротравму.

При виявленні загрози безпечному проведенню роботи, необхідно доповісти про це керівнику і до роботи не приступати. Дозволяється приступати до роботи тільки після усунення виявлених недоліків.

Працювати слід в охайно заправленому одязі, волосся прибрати під головний убір. Рукави одягу підгорнути до ліктя або застебнути до зап'ястя рук. Не заколювати одяг голками, не держати в кишенях одягу булавок, скляних та інших предметів, що б'ються.

Під час роботи дотримуватись правил санітарної гігієни: дотримуватися чистоти одягу, взуття, не працювати у взутті без задників; утримувати в чистоті технологічне обладнання; перед початком роботи вимити руки з милом.

Перед пуском у роботу технологічного устаткування необхідно перевірити: справність контрольно-вимірювальних приладів і захисних огорож; наявність заземлення; цілість і справність кнопок на щитку керування;

Інструменти на столі розташовувати так, щоб запобігти їхньому падінню.

Не заставляти проходи.

Перевірте міцність кріплення обладнання на робочому місці (столі, фундаменті або рухомому возику).

Закріплюйте надійно змінні механізми на корпусі електроприводу за допомогою гайок-баранців.

3.3 Вимоги безпеки під час роботи

Уважно та чітко виконуйте вказівки викладача.

Працівник під час роботи з електрообладнанням повинен:

- підтримувати порядок на робочому місці;
- виконувати на електрообладнанні тільки ту роботу, для якої воно призначене;
- дотримуватися технології виконання роботи, передбаченої для даного типу електрообладнання.

При роботі електрообладнання забороняється:

- залишати включене електрообладнання без нагляду;
- передавати електрообладнання в експлуатацію особам, які не мають права ним користуватися;
- ударяти по електрообладнанню;
- знімати засоби захисту (захисні щити, кожухи тощо);
- смикати для відключення за шнур живлення;
- тримати палець на вимикачі під час перенесення електроустаткування;

- натягувати, перекручувати та перегинати шнур живлення, ставити на нього сторонні предмети;
- допускати торкання кабелю (шнура) до гарячих або теплих предметів;
- самостійно розбирати або ремонтувати електрообладнання.

При виявленні несправностей в роботі електрообладнання (іскріння, спалахів, пошкодження ізоляції електропроводів, кабелів тощо), роботу необхідно припинити та повідомити про це керівника. Несправне електрообладнання здати для перевірки або ремонту.

3.4 Вимоги безпеки по закінченню роботи

Припинити роботу. Вимкнути обладнання від мережі живлення.

Привести робоче місце в належний стан, зібрати та скласти у відведені місця залишки матеріалів, інструменти тощо.

Зняти спеціальний одяг, спецвзуття, інші ЗІЗ та помістити їх до місця зберігання.

Доповісти керівнику про виявлені під час роботи недоліки.

3.5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

В процесі роботи можуть виникнути наступні аварійні ситуації:

- Пошкодження контуру заземлення.
- Пошкодження Ізоляції проводів під напругою, особливо проводів, що знаходяться під напругою більше 300В.
- Попадання людини під дію електричного струму.
- Виникнення пожежі.

У разі виникнення аварійної ситуації необхідно:

- обгородити небезпечну зону і не допускати в неї сторонніх осіб; якщо обстановка не загрожує життю і здоров'ю працівників і не повинна призвести до

більш тяжких наслідків, необхідно її зберегти такою, якою вона була на момент настання події, для проведення розслідування;

- при пожежі приступити до її ліквідації; якщо погасити пожежу своїми силами неможливо, викликати пожежну команду;

- повідомити про те, що сталося, керівника робіт.

У разі настання нещасного випадку:

- При виявленні пошкодження контуру заземлення або заземлюючих проводів негайно припинити роботу, не торкаючись приладів, повідомити лаборанту про помічені порушення.

- Негайно відключити прилад від електромережі, повідомити викладача або лаборанта про помічені порушення.

- При поразці електричним струмом необхідно швидко відключити прилад від електромережі або звільнити потерпілого від контакту з приладом, проводом, що знаходиться під напругою, використовуючи ізоляційні матеріали, надати першу допомогу, викликати швидку медичну допомогу.

- При виникненні пожежі негайно повідомити викладача, лаборанта. Відключити електромережу (головним рубильником), а після цього використати протипожежні засоби.

В лабораторії забороняється приступати до роботи при поганому самопочутті або раптовій хворобі.

При появі сторонньої особи, яка застосовує протиправні дії щодо його безпеки або оточуючих, викликати поліцію за телефоном 102.

При виявленні небезпечної ситуації (пожежа, повітряна тривога, радіаційна небезпека, неполадки в електрогосподарстві тощо) заспокоїтись і заспокоїти оточуючих. Оцінити важкість аварійної ситуації.

Не усувати самому несправностей електромережі та електрообладнання, а вимкнути загальне електропостачання.

При виявленні пожежі:

- негайно викликати пожежну частину за телефоном 101;

- повідомити директора або заступника директора з адміністративногосподарської роботи, завідувача лабораторії;

- приступити до ліквідації осередку загоряння за допомогою вогнегасника;
- вжити заходів згідно з планом евакуації на випадок пожежі та вивести людей у безпечне місце;

- організувати роботу щодо збереження державного майна та цінних паперів.

Дії при ураженні електричним струмом:

- необхідно негайно звільнити потерпілого від дії електричного струму, відключивши електрообладнання від джерела живлення, а при неможливості відключення - відтягнути його від струмопровідних частин за одяг або застосувавши підручний ізоляційний матеріал;

- при відсутності у потерпілого дихання і пульсу необхідно зробити йому штучне дихання і непрямий (зовнішній) масаж серця, звернувши увагу на зіниці. Розширені зіниці свідчать про різке погіршення кровообігу мозку. При такому стані оживлення починати необхідно негайно, після чого викликати швидку медичну допомогу (103).

Дії при пораненні:

- для надання першої допомоги при пораненні необхідно розкрити індивідуальний пакет і накласти стерильний перев'язувальний матеріал;

- якщо індивідуального пакета не буде, то для перев'язки необхідно використати чисту тканину (носову хустинку тощо). На те місце тканини, що приходить безпосередньо на рану, бажано накапати декілька капель розчину йоду, щоб одержати пляму розміром більше рани, а після цього накласти тканину на рану. Особливо важливо застосовувати розчин йоду зазначеним чином при забруднених ранах.

- для того, щоб зупинити кровотечу, необхідно підняти поранену кінцівку вгору, кровоточиву рану закрити перев'язувальним матеріалом, складеним у клубочок, придавити її зверху, не торкаючись самої рани, потримати протягом 4-5 хв; якщо кровотеча зупинилася, то, не знімаючи накладеного матеріалу,

поверх нього покласти ще одну подушечку з іншого пакета чи шматок вати і забинтувати поранене місце (з деяким натиском);

- при сильній кровотечі, яку не можна зупинити пов'язкою, застосовується здавлювання кровоносних судин, які живлять поранену область, за допомогою згинання кінцівок у суглобах, а також пальцями, джгутом або закруткою; при великій кровотечі необхідно терміново викликати лікаря.

Дії при теплових опіках:

- при опіках вогнем, парою, гарячими предметами в жодному разі не можна відкривати пухирі, які утворюються, та перев'язувати опіки бинтом;

- при опіках першого ступеня (почервоніння) обпечене місце обробляють великої кількістю холодної води;

- при опіках другого ступеня (пухирі), при опіках третього ступеня (зруйнування шкіряної тканини) накривають рану стерильною пов'язкою та викликають лікаря.

При усіх випадках аварійній ситуації, а також якщо стався нещасний випадок з працівником, студентом, негайно повідомити керівника коледжу, завідувача лабораторії і інженера з охорони праці. Виконувати всі вказівки керівника робіт по ліквідації небезпеки.

ВИСНОВКИ

У даній роботі вирішено актуальну наукову задачу, яка полягає у встановленні закономірностей вибору величин компенсуючих ємностей компенсованого асинхронного генератора в режимі пуску та за динамічно змінюваного навантаження компенсованого асинхронного двигуна для підвищення енергоефективності автономних систем електроживлення.

Шляхом аналізу встановлено, що асинхронні електродвигуни як струмоприймачі сільських господарств, потужність яких не перевищує 10 кВт, становлять 60–70 % загального навантаження. Асинхронні двигуни малої потужності мають низький $\cos\varphi$, великі пускові струми і при запуску від автономного генератора потребують значної (5–7 – кратної) форсувальної здатності системи збудження та завищення на 40–50 % потужності автономної електростанції, що призводить до зниження ефективності таких комплексів.

На відміну від відомих компаундованих асинхронних генераторів, які потребують великих ємностей при паралельному їх включенні з навантаженням, використання автономного асинхронного генератора з включення двох робочих напівобмоток статора за схемою поворотного автотрансформатора на компенсуючу ємність, значною мірою, забезпечує стабілізацію напруги. Доведено, що конструктивним удосконаленням компенсованого асинхронного генератора, порівняно з базовою машиною, є поділ фазної зони обмотки статора на дві рівні частини з просторовим зміщенням їх між собою на кут $\Theta = -30^\circ$. Це дало змогу за незмінної реактивної потужності навантаження, знизити споживання реактивної потужності компенсованого автономного асинхронного генератора на 15–20 % у порівнянні з базовим.

Встановлено, що схема обмоток статора забезпечує подвійне внутрішнє ємнісне підмагнічування за АТ-схемою з компенсуючою ємністю C_Δ на його виході і за трансформаторною схемою між первинною та вторинною обмотками

АТ при включенні вторинної обмотки на додаткову ємність C_k . Це дало можливість регулювати вихідну напругу генератора і здійснювати форсування ємнісного збудження генератора, зокрема, під час пуску асинхронного двигуна сумірної потужності.

Досліджена робота компенсованого асинхронного генератора на автономну мережу зі змінним навантаженням, у результаті якого одержано закон регулювання співвідношень між зовнішніми та внутрішніми ємностями для підтримання напруги у заданих межах. Величина зовнішньої, внутрішньої та додаткової ємності при змішаному та додатковому збудженні становлять відповідно, 30–35; 50–55; 10–15 мкФ у кожній фазі на 1 кВт потужності генератора.

Для підтвердження одержаних теоретичних результатів проведено експериментальні дослідження зразків компенсованих асинхронних машин автономної системи електроживлення в лабораторії кафедри електричних машин та експлуатації електрообладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України, що підтвердило сходимість розрахункових та експериментальних характеристик із похибкою, що не перевищує 7 %. Встановлено, що надійна робота серійного асинхронного двигуна від компенсованого автономного асинхронного генератора в електромеханічному комплексі забезпечується шляхом застосування обґрунтованої величини змішаної і додаткової ємностей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Китаев А. В. О физическом механизме самовозбуждения асинхронной машины / А. В. Китаев, И. Н. Орлов // Электричество. – 1978. – №4. – С. 47–51.
2. Кицис С. И. Переходные процессы емкостного самовозбуждения асинхронного генератора под нагрузкой. / С. И. Кицис // Энергетика и транспорт. – 1997. – С. 27–43.
3. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. / И. А. Сыромятников // М. – Л. : ГЭИ, 1963. – 528 с.
4. Копылов И. П. Электрические машины. / И. П. Копылов // – М. : Высшая школа, 2002. – 607 с.
5. Автономные асинхронные генераторы повышенной эффективности/ В. И. Мишин, В. В. Каплун, А. Н. Кулинич, С. С. Макаревич // Електрифікація і автоматизація сільського господарства.– 2006. – № 2–4, С. 41–51.
6. Пат. 83730 Україна МПК Н02К 17/00. Автономний асинхронний генератор / Мішин В. І., Каплун В. В., Козирський В. В., Кулинич А. М., Макаревич С. С. ; заявник і власник Національний аграрний університет. – № а200610561 ; заявл. 05.10.06 ; опубл. 11.08.08, Бюл. № 15.
7. Пат. 89884 Україна МПК Н02К 17/00 Н02К 17/42. Автономний асинхронний генератор / Мішин В. І., Каплун В. В., Козирський В. В., Макаревич С. С. ; заявник і власник Національний аграрний університет. – № а200809091 ; заявл. 11.07.08 ; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5.
8. Вольдек А. И. Электрические машин. / А. И. Вольдек // – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
9. Мишин В. И. Автономный асинхронный генератор с внутренним ёмкостным возбуждением / В. И. Мишин, В. В. Каплун, С. С. Макаревич // Электротехника. – 2011. – № 3. – С. 20–26.

10. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин : Учебник для вузов. / И. П. Копылов. 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.
11. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / [А. Э Кравчик., М. М. Шлаф и др.] – М. : Энергоиздат, 1982. – 504с.
12. Специальные электрические машины / Под ред. А. И. Бертинова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 552 с.
13. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. / В. А. Балагуров. – М. : Высш. шк., 1982. – 272 с.
14. Лісник В. Я. Вплив параметрів асинхронної машини та схемних рішень системи збудження на характеристики автономного асинхронного генератора зі змішаним навантаженням/ В. Я. Лісник, Ю. В. Шуруб // Електрифікація і автоматизація сільського господарства. –2006.– № 1. – С. 25–33.
15. Макаревич С. С. Використання типової кривої намагнічування феромагнітних пристроїв у моделюванні усталених та квазіусталених режимів [Електронний ресурс] / С. С. Макаревич // Енергетика і автоматика – 2011. – № 2(8). – Режим доступу до журн. : http://www.nbu.gov.ua/e-journals/eia/2011_2/11mssacd.pdf
16. Розенблат М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. / М. А. Розенблат. – М. : Наука, 1966. – 720с.
17. Бессонов Л. А. Нелинейные электрические цепи. / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1977. – 343 с.
18. Филиппов Е. С. Нелинейные электротехника. / Е. С. Филиппов. – М. : Высшая школа, 1977.-343 с.
19. Мишин В. И. Статические нелинейные цепи с вращающимся магнитным полем. / В. И. Мишин. – Кишинёв, Ш., 1973. – 195 с.
20. Мишин В. И. Аппроксимация кривых намагничивания кубическими сплайнами. / В. И. Мишин // Известия ВУЗ Энергетика. 1978. – № 7, С. 123–126.

21. Мишин В. И. Моделирование аварийных режимов электродвигателей в сельском хозяйстве / В. И. Мишин, И. В. Собор. – Кишинёв: Ш., 1991, – 127 с.

22. Пат. 30906 А Україна МПК5 Н 02 К 17/34. Асинхронний двигун / Мішин В. І., Чуєнко М. О. [та ін.] ; заявник і власник Національний аграрний університет. – № 98063167 ; заявл. 18.06.98 ; опубл. 15.12.00, Бюл. № 7/2000.

23. Мишин В.И. Компенсированный асинхронный генератор для автономных систем электроснабжения / В. И Мишин., В. В. Каплун, В. В. Козырский, А. Н. Кулинич, С. С. Макаревич // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №2. – С. 42–47.

24. Методика розрахунку характеристик автономних асинхронних генераторів зі змішаним ємнісним збудженням / Мішин В. І, Каплун В. В. та ін. – К. : НАУ, 2007 – 44 с.

25. Компенсовані асинхронні машини: монографія / [В. І. Мішин, В. В. Каплун, Р. М. Чуєнко, С. С. Макаревич, В. В. Гаврилюк] – К. : КНУТД, 2012. – 220 с.

26. Пат. 100196 Україна МПК Н02К 17/00 Н02К 17/30. Спосіб забезпечення безперебійної дієздатності автономного електромеханічного комплексу / Мішин В. В, Козирський В. В., Каплун В. В., Чуєнко Р. М., Макаревич С. С. Гаврилюк В. В; заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № a201106895 ; заявл. 11.06.2011; опубл. 26.11.2012, Бюл. № 22.

27. Макаревич С. С. Автономний електромеханічний комплекс з компенсованими асинхронними машинами [Електронний ресурс] / С. С. Макаревич // Енергетика і автоматика. – 2012. - №2(8). – Режим доступу до журн. : http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/eia/2012_2/12mssaem.pdf.(не використано у посиланнях)

28. Бешун О. А. Вплив регулювання потужності дизеля відключенням робочих циклів на його економічні, екологічні та динамічні показники : дис. кандидата. техн. наук. 05.05.03. / Бешун О. А. // Нац. аграр. ун-т. – К., 2006.

29. Патрахальцев Н. Н. Отключение цилиндров и циклов как способ повышения динамических качеств дизель-генераторов. / Н. Н. Патрахальцев, А. В. Костиков, А. Вальдерама Ромео // Автомобильная промышленность, 2001. № 1. – С. 14–16.

30. Філіппов А. Про можливість регулювання потужності багатоциліндрових дизельних двигунів методом відключення окремих робочих циклів / А. Філіппов, О. Бешун., Е. Krasowski // Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, Національний аграрний університет. Polska Akademia Nauk Oddzial w Lublinie. К. – Lublin. – 2001. Т. 1. – С. 33–37.

31. Агеев Л. Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов. – Л. : Колос, 1978. – 296 с.

32. Сипайлов Г. А. Математическое моделирование электрических машин / Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос. – М. : Высшая школа, 1980. – 176 с.

33. Макаревич С. С. Особливості енергетичних перетворень в автономному електромеханічному комплексі з компенсованими асинхронними машинами / С. С. Макаревич // Науковий вісник НУБіП України. – 2012. – № 174, Ч. 1. – С. 119–125.

34. Чиликин М. Г. Теория автоматизированного электропривода: Учеб.пособие для вузов./М. Г.Чиликин.-М. : Энергия, 1979. – 616 с.

35. Мішин В. І. Сумісна робота різнорідних асинхронних машин в автономному електромеханічному комплексі / В. І. Мішин, Р. М. Чуєнко, С. С. Макаревич // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 49 (955). – С. 49–59.

36. Макаревич С. С. Математична модель автономного електромеханічного комплексу з компенсованими асинхронними машинами / С. С. Макаревич// Енергетика і електрифікація. – 2009. – № 2. – С. 17–22.

37. Мишин В. И. Асинхронный электромеханический комплекс в автономной системе / В. И. Мишин, В. В. Каплун, С. С. Макаревич // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 1. – С. 30–35.

38. Мишин В. И. Асинхронные электродвигатели с улучшенными энергетическими и пускорегулировочными характеристиками / В. И. Мишин, Н. Т. Лут // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – № 17. – К–Х. – 2001. – С. 110–112.