


Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МОІСЕЄВ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 62-832:52-832

**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ КОМПЛЕКС
АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ТУРБОДЕТАНДЕРОМ
ДЛЯ СТАНЦІЙ ГАЗОТРАНСПОРТУВАННЯ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Харків

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Клепиков Володимир Борисович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматизованих
електромеханічних систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Кузнецов Борис Іванович,
Науково - технічний центр магнетизму
технічних об'єктів Національної академії наук
України, завідувач відділом проблем управління
магнітним полем

кандидат технічних наук, доцент
Буряковський Сергій Геннадійович,
Українська державна академія залізничного
транспорту, доцент кафедри автоматизованих
систем електричного транспорту

Захист відбудеться « 1 » листопада 2012 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Автореферат розісланий « 29 » вересня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.В. Осичев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У газотранспортній системі України експлуатується більше 1600 газорозподільних станцій (ГРС) та 51000 газорозподільних пунктів (ГРП), призначенням яких є зниження тиску газу до значень, потрібних споживачу. ГРС обслуговують крупних споживачів (промислові підприємства, теплові електростанції, розподільні системи міст та підприємств), знижуючи тиск від 5,5 – 7,4 МПа, який має місце у магістральних газопроводах (МГ), до 0,3 – 0,6 МПа.

Для функціонування ГРС та ГРП (живлення приладів автоматики та вимірювання, виконання ремонтних робіт, освітлення та інш.) необхідне джерело електроенергії, потужність якого, для власних потреб газотранспортних систем ДК «Укртрансгаз», становить більш 150 МВт.

Однак нерідко ГРС та ГРП знаходяться на значній відстані від мереж електроживлення. Підведення ліній електропостачання вимагає значних капіталовкладень, тому звичайно замість цього на ГРС і ГРП встановлюється автономне джерело електроживлення у вигляді дизель-генератора. Таке рішення пов'язане з необхідністю витрат на недешеві органічні енергоресурси, транспортні витрати на їх доставку, та з негативним екологічним ефектом, внаслідок шкідливих викидів у повітря продуктів згорання палива у двигуні внутрішнього згорання.

В той же час існує можливість використання у якості джерела механічної енергії для електрогенератора такого пристрою, як турбодетандер, який, використовуючи функцію зниження тиску газу, виробляє механічну енергію обертового руху. Створення автономного джерела електричної енергії з використанням турбодетандера усуває недоліки системи дизель-генератор. Вирішення вищевказаних науково-практичних задач визначило напрямок теми дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем НТУ «ХП» у рамках держбюджетної теми МОН України «Розробка експериментального зразка енергоресурсозберігаючого джерела електричної енергії для систем газотранспортування» (ДР № 0109U002397), де здобувач був відповідальним виконавцем, та пов'язана із замовленням ПАТ «Турбогаз» (м. Харків).

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в розробці, створенні та дослідженні енергоресурсозберігаючого автономного джерела електроживлення для газорозподільних станцій і пунктів, які удалені від ліній електроживлення.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

– обґрунтувати та розробити раціональну структуру автономного джерела електроживлення для ГРС та ГРП, яка враховує особливості зниження температури газу при зниженні його тиску;

– визначити принципи стабілізації та забезпечення якості електроенергії в автономному джерелі;

– розробити методику розрахунку автономного джерела електроживлення для ГРС і ГРП;

– побудувати повну математичну модель електромеханічної системи з урахуван-

ням її динамічних властивостей, вивести співвідношення для розрахунку ємності конденсаторів самозбудження асинхронного генератору з урахуванням особливостей роботи схеми;

- створити імітаційну модель системи «Турбодетандер – асинхронний генератор – випрямляч – ШПІ – автономний інвертор напруги », з урахуванням динамічних властивостей системи та ланок системи автоматичного регулювання;

- провести дослідження динамічних та аварійних режимів роботи схеми шляхом імітаційного моделювання;

- створити лабораторну установку автономного джерела електроживлення, та провести експериментальні дослідження. Зробити висновки та надати рекомендації до створення експериментального зразка.

Об'єкт дослідження – електромеханічні та електромагнітні процеси в автономному джерелі з турбодетандером.

Предмет дослідження – електромеханічний комплекс «Турбодетандер – асинхронний генератор – випрямляч – ШПІ, інвертор», як автономне джерело електричної енергії для ГРС і ГРП.

Методи дослідження. При виконанні роботи використовувались методи аналізу і синтезу – для обґрунтування раціональної структури автономного джерела електроенергії ГРС і ГРП. Методи теорії електричних машин – для моделювання процесу самозбудження асинхронного генератора. Методи теорії автоматичного керування – для розробки релейної системи регулювання напруги та теорії електротехніки при виведенні співвідношень для розрахунку ємності самозбудження, методи комп'ютерного моделювання – для побудови повної комп'ютерної моделі комплексу та моделюванні нормальних і аномальних режимів роботи. Методи теорії електроприводу – при виведенні співвідношень електромеханічної системи, розрахунках, аналізі статичних та динамічних режимів її роботи. Фізичне моделювання для перевірки отриманих теоретичних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- Науково обґрунтовані принципи створення енергоресурсозаощаджуючого автономного джерела електроживлення (АДЕЖ) для ГРС то ГРП з урахуванням особливостей зниження тиску газу турбодетандером. Використання турбодетандера дозволяє отримати механічну енергію на валу, яка потім перетворюється в електричну енергію з заданим гармонічним складом, а також з стабільними параметрами.

- Запропоновані принципи побудови структури та функціональна схема АДЕЖ з турбодетандером та асинхронним генератором, яка забезпечує стабілізацію вихідних параметрів напруги.

- Вдосконалені співвідношення для розрахунку ємності самозбудження АГ з урахуванням особливостей роботи електромеханічної системи, з урахуванням реактивів обмоток статора. Використання отриманих співвідношень дозволяє працювати асинхронному генератору в зоні невеликих насичень магнітної ланки.

- Вперше розроблена методика розрахунку електрообладнання АДЕЖ з турбодетандером та асинхронним генератором, яка дозволяє провести вибор електричного генератора, а також силових напівпровідникових пристроїв.

– Розроблені математична та імітаційна моделі електромеханічної системи «Турбодетандер – асинхронний генератор – випрямляч – широтно-імпульсний перетворювач, інвертор», яка враховує динамічні властивості системи автоматичного регулювання та імпульсний характер роботи напівпровідникових елементів перетворювача.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці економічно та екологічно ефективного автономного джерела електроживлення у вигляді електромеханічної системи «Турбодетандер – асинхронний генератор – випрямляч – широтно-імпульсний перетворювач, інвертор» для електротехнічної галузі, яке має технічно новизною, підтвердженою патентом та забезпечує задану стабільність та якість вихідної напруги (патент України №41977).

Виконання роботи пов'язане із замовленням ПАТ «Турбогаз» на розробку та дослідження електромеханічного комплексу з турбодетандером потужністю 10 кВт, як джерела електричної енергії для ГРС та ГРП, яке б забезпечило задані техніко-економічні показники.

За матеріалами роботи виготовлено та передано для експлуатації ПАТ «Турбогаз» 4 комплекти електрообладнання джерела, один з яких встановлено в ООО «ГАЗПРОМТРАНСГАЗ ВОЛГОГРАД» (Росія), на станції ЛПУ МГ АГРС-5, що підтверджено відповідним актом впровадження.

Особистий внесок здобувача. Усі основні положення і результати, які виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка математичної моделі фізичних процесів та проведення імітаційного комп'ютерного моделювання процесів самозбудження в електромеханічній системі; запропоновано засіб забезпечення якості вихідної напруги регулюванням навантаження АГ у вигляді теплоелектронагрівачів (ТЕН) в комплексі з синусоїдальною ШІМ інвертора; розроблено функціональну схему комплексу та принципову схему лабораторної установки автономного джерела. Складено програму проведення лабораторних досліджень. Виконано аналіз отриманих експериментальних результатів перехідних процесів, та їх співставлення з даними імітаційного моделювання. Побудовані математичні моделі АГ з урахуванням індуктивностей розсіювання і навантаження та виконано імітаційне моделювання. Побудована повна комп'ютерна модель електромеханічної системи «Турбодетандер – асинхронний генератор – випрямляч – широтно-імпульсний перетворювач, автономний інвертор напруги» з урахуванням нелінійності системи та імпульсного характеру електромагнітних процесів; виведені співвідношення для визначення ємності самозбудження АГ в умовах комплексу, що враховують індуктивності розсіювання і навантаження, та їх перевірку імітаційним моделюванням і фізичним експериментом; запропоновано засоби забезпечення якості вихідної напруги інвертора. Постановка задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на щорічних семінарах наукової ради НАН України «Динаміка автоматизованих електромеханічних систем» НТУ «ХП», (м. Харків, 2007 – 2011 рр.) та на Міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми автоматизо

ваного електроприводу. Теорія і практика» (сmt. Миколаївка, 2007 р., м. Одеса 2011 р.); «Електромеханічні системи, методи моделювання і оптимізації» (м. Кременчук, 2007 – 2008 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 9 наукових праць, з яких 7 статей у фахових наукових виданнях України, 1 патент України на крисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації складає 152 сторінок, з них 48 рисунків по тексту та 16 рисунків на 16 сторінках; 1 таблиці по тексту; 4 додатків на 13 сторінках та списку використаних джерел із 76 найменувань на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульована мета дисертаційної роботи, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами і темами. Наведені завдання, предмет, об'єкт та методи дослідження, викладена наукова новизна отриманих результатів, їх практичне значення, та положення, що виносяться на захист. Визначений особистий внесок здобувача.

У першому розділі виконано аналіз науково-технічних рішень створення джерел автономного електроживлення. Співставлені схеми автономних джерел електроживлення з використанням дизель-генератору, енергії вітру, та сонячної енергії у діапазоні потужностей 5-15 кВт, необхідних для ГРС та ГРП. Показано, що побудова вищевказаних джерел електричної енергії потребує суттєвих капіталовкладень, або експлуатаційних витрат і багатократно поступається по цих показниках варіанту побудови автономного джерела електроенергії з використанням, в якості джерела механічної енергії, турбодетандера, що працює за рахунок зниження тиску газу, безпосередньо транспортуємого у газовій мережі. Зазначено, що існуючі джерела електроживлення, з використанням турбодетандера і забезпеченням стабілізації параметрів електричної енергії, створені в основному на потужності сотні кВт та більше. При цьому одним з засобів стабілізації вихідної напруги, є зміна кута повороту лопатей робочого колеса при зміні навантаження. Розглянуті різні типи електрогенераторів, та визначено доцільність використання, в якості електрогенератора, для джерела що розробляється, асинхронної машини, яка має відомі переваги у порівнянні із генераторами постійного струму та синхронними генераторами.

Другий розділ присвячено науковому обґрунтуванню принципів побудови автономного джерела електроживлення для газорозподільних мереж, засобів стабілізації вихідних параметрів, визначенню виду функціональної схеми, аналізу етапів перетворення енергії, розробці принципальної схеми силового каналу та загальної методики розрахунку автономного джерела електроживлення.

Технологічні особливості транспортування газу, схеми перетворення енергії газу в електричну з використанням турбодетандеру представлена на рис. 1. У склад турбодетандерної електростанції 1 входить турбодетандер 1.1 та генератор

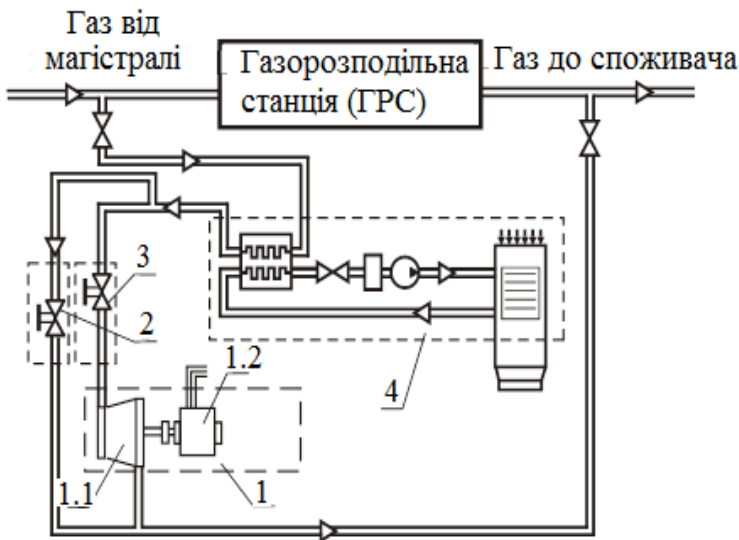


Рис.1. Схема підключення турбодетандеру до газотранспортної мережі

В роботі запропоновано підігрівати газ теплоелектронагрівачами, автоматично підтримуючи сумарне навантаження асинхронного генератора на номінальному рівні, забезпечити при цьому стабільність вихідної напруги та високий ККД. Для виключення додаткових джерел електричної енергії при запуску АГ, прийнято використовувати самозбудження.

Проведений аналіз довів доцільність сформулювання наступних принципів побудови раціональної структури джерела електроживлення для ГРС и ГРП:

- використати у якості джерела механічної енергії - турбодетандер;
- механічну енергію перетворювати в електричну асинхронним генератором із самозбудженням;
- стабілізацію вихідної напруги генератора здійснювати за рахунок регульованого баластного навантаження.
- необхідні показники змінної напруги забезпечити комплексним використанням засобів регулювання напівпровідниковими перетворювачами.

З урахуванням вищесказаного запропонована наступна функціональна схема автономного джерела електроживлення для ГРС и ГРП (рис. 2). ТД – турбодетандер, який виконує роль перетворювача енергії газу в механічну енергію обертання ротора асинхронного генератора АГ, який перетворює механічну енергію в електричну енергію 3^х фазного змінного струму. Для забезпечення самозбудження АГ до статорної обмотки підключено блок конденсаторів самозбудження БКС. Трифазна напруга змінного струму випрямляється випрямлячем В, після чого фільтрується емнісним фільтром Ф. Автономний інвертор напруги АІН перетворює постійну напругу в змінну напругу потрібного значення та форми. Стабільність випрямленої напруги здійснюється широтно – імпульсним перетворювачем

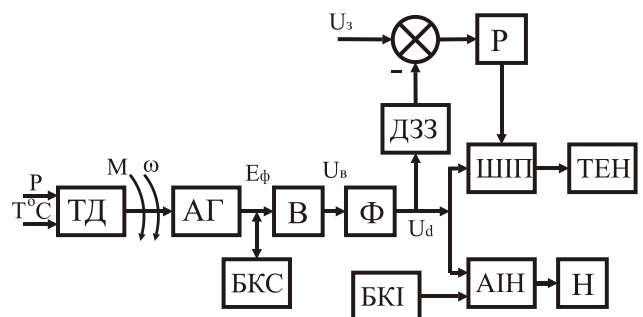


Рис.2. Функціональна схема автономного джерела живлення

1.2. Газ підводиться до турбодетандеру через блок клапана 3, у разі аварії газ минає турбодетандер через блок байпасного клапана 2. Підігрів газу відбувається у теплообміннику 4.

Однією з технологічних особливостей зниження тиску газу є зниження його температури, в той час як її значення не може бути нижче установленної величини. Для забезпечення необхідної температури газ підігривають.

чем ШПІ з датчиком зворотного зв'язку ДЗЗ за напругою. Керування ШПІ здійснюється релейним регулятором Р, який дозволяє визначити діапазон пульсацій середньої напруги випрямляча у межах технічного завдання $\pm 5\%$. До ШПІ підключено теплоелектронагрівач ТЕН, який виконує подвійну функцію: по-перше – підігрів газу, по-друге – виконує роль баластного регулюємого навантаження на рівні номінального значення, що в свою чергу забезпечує стабільність вихідної напруги генератора. Керування АІН виконує блок керування інвертором БКІ. Автономний інвертор працює на навантаження Н, якими на ГРС та ГРП є освітлення, блоки живлення контрольно-вимірювальних пристроїв та інш.

В розділі наведені основні співвідношення складових компонентів електромеханічної системи, необхідних для урахування загальної методики розрахунку автономного джерела електроживлення. При проходженні одиниці маси газу через турбодетандер енергія газу змінюється на величину $L_0 = C_0(T_{вх} - T_{вих})$, де C_0 – питома теплоємність газу на одиницю маси; $T_{вх}$, $T_{вих}$ – температура газу на входе та виході детандеру. Ця енергія перетворюється в механічну, потужність якої пропорційна масі газу який пройшов через турбодетандер в одиницю часу $N_T = G_T \cdot L_0$, де G_T – розхід газу в одиницю часу. В свою чергу, розхід газу визначається його щільністю, площею поперечного перетину, через яке він проходить, та швидкістю його руху: $G_T = \rho \cdot S \cdot V$, де ρ – щільність газу; S – площа поперечного перетину; V – швидкість руху газу. На лопатях турбодетандеру відбувається перетворення теплової енергії газу в механічну. Обертний момент M_T , який розвивається на валу, при швидкості ω визначається з відомого співвідношення $M_T = \frac{N_T}{\omega}$. Механічні характеристики $M_T(\omega)$ турбодетандера при різних значеннях розходу газу представлені на рис.3. Для практичних цілей робочу ділянку МХ турбодетандера можна лінеаризувати $M_T = \beta_T(\omega_{0T} - \omega)$, β_T - жорсткість механічної характеристики на робочій ділянці; ω_{0T} - умовна швидкість холостого ходу лінеаризованої МХ. Характеристика 1,2 и 3 відповідає розходам газу $G_1 < G_2 < G_3$. Вид характеристики свідчить о том, що робота ТД без навантаження недопустима у зв'язку з різким ростом швидкості при $M_c = 0$.

Особливістю роботи АГ за запропонованими принципами є регулювання його навантаження на рівні номінального. Це забезпечується ШПІ, що працює на теплонагрівальні елементи, як баластне навантаження. Таке регулювання в свою чергу забезпечує стабільність робочої точки АГ. На відміну від звичайного використання АГ із самозбудженням, що працюють на змінне навантаження і мають коефіцієнт насичення 2-4, у нашому випадку

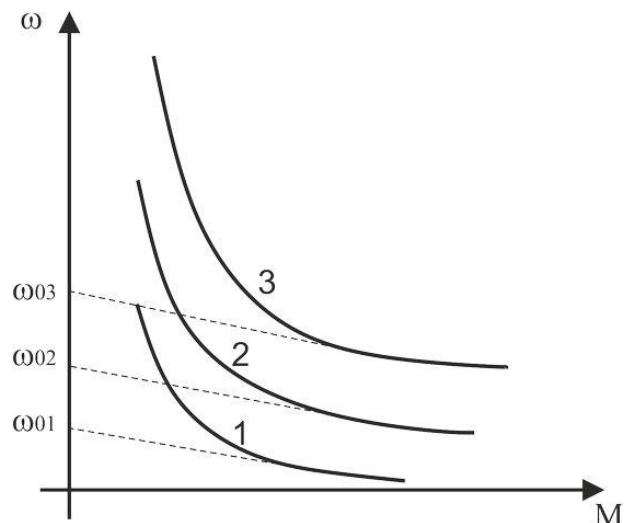


Рис.3. Механічні характеристики (МХ) турбодетандера

дку можна забезпечити значення коефіцієнту насичення 1,1-1,2. Завдяки цьому створюється умови більш наближені до синусоїдального характеру струму і розглядання схеми заміщення як лінійної стає більш коректним.

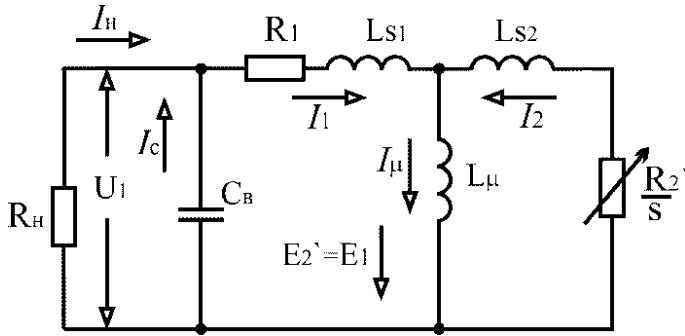


Рис 4. Розрахункова схема заміщення фази генератора

Для отримання розрахункових співвідношень, при визначенні значення ємності самозбудження використано схему заміщення представлену на рис 4. На відміну від відомих методик визначення ємності самозбудження C_6 приймається, що ЕДС гілки намагнічення L_μ дорівнює напрузі на ємності самозбудження.

Враховуємо вплив активного опору статорної обмотки R_1 опіри розсіяння ΩL_{s1} и ΩL_{s2} та навантаження $\frac{R_2'}{s}$.

Для розрахункової схеми виконуються співвідношення

$$\vec{U}_2 = -\vec{I}_2 Z = -\vec{I}_2 \left(j\Omega L_{s2}' + \frac{j\Omega L_\mu ((j\Omega L_{s1} + R_1)(1 + j\Omega C_6 R_n) + R_n)}{(j\Omega L_{s1} + R_1)(1 + j\Omega C_6 R_n) + R_n + j\Omega L_\mu (1 + j\Omega C_6 R_n)} \right), \quad (1)$$

$$\vec{U}_2 = \vec{I}_2 \frac{R_2'}{s}. \quad (2)$$

Дорівнюючи співвідношення (1) і (2), отримано розрахункову залежність

$$\frac{R_2'}{s} = j\Omega L_{s2}' + \frac{j\Omega L_\mu [(j\Omega L_{s1} + R_1)(1 + j\Omega C_6 R_n) + R_n]}{(j\Omega L_{s1} + R_1)(1 + j\Omega C_6 R_n) + R_n + j\Omega L_\mu (1 + j\Omega C_6 R_n)}. \quad (3)$$

Після самозбудження, у сталому режимі роботи, АГ віддає отриману від турбодетандера енергію активному навантаженню. Це означає рівність нулю суми реактивної енергії конденсатора самозбудження та індуктивностей схеми, що відповідає рівності нулю уявної частини отриманого співвідношення (3)

$$\begin{aligned} & C^2 [\Omega^4 (L_1 + L_\mu)(L_\mu L_1 + L_2 L_1 + L_2 L_\mu) R^2 + \Omega^2 (L_2 + L_\mu) R^2 R_1^2] - \\ & - C\Omega^2 (2L_1 L_\mu + 2L_2 L_1 + 2L_2 L_\mu + L_\mu^2) R^2 + \\ & + \Omega^2 (2L_1 L_2 L_\mu + L_2 L_1^2 + L_2 L_\mu^2 + L_\mu L_1^2 + L_1 L_\mu^2) + (L_\mu + L_2)(R + R_1)^2 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

З урахуванням практичних спрощень одержано рівняння для визначення ємності самозбудження у вигляді $aC_6^2 + bC_6 + d = 0$, де $a = \Omega^2 L R_n^2 [\Omega^2 L_\mu (L_1 + L_2) + R_1^2]$, $b = 2\Omega^2 R_n^2 L_\mu (L_1 + L)$, $d = \Omega^2 L_\mu L_1 (L_2 + 2L) + L(R_n + R_1)^2$. У роботі наведені спрощені вирази для визначення ємності самозбудження, які враховують практичне співвідношення індуктивностей розсіювання, та ланки намагнічення.

Співвідношення (4) посвідчує, що для вибраної асинхронної машини при задано-

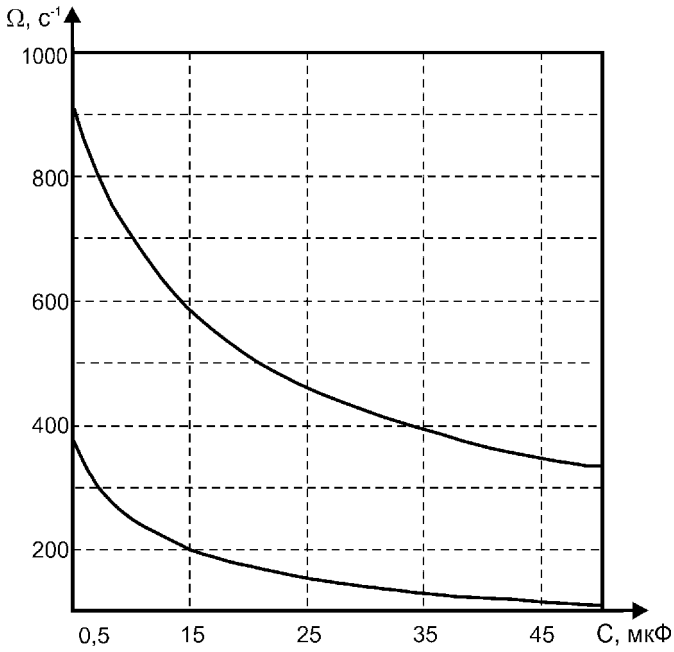


Рис.5. Залежність частоти струму від ємності

альну схему силової частини наведену на рис. 6.

му навантаженні, ємність конденсаторів самозбудження фази визначається тільки кутовою частотою електричного струму статора. Графічна залежність розрахована для машини 4A100L4Y3 та наведена на рис.5. Аналіз цієї залежності свідчить про зниження розрахункової ємності самозбудження зі зростанням частоти. Доведено, що величину значення Ω , виходячи з практичних міркувань, треба приймати близькою до 50 Гц, тобто до номінальної частоти асинхронної машини.

На основі вищенаведених принципів перетворення енергії, а також функціональної схеми синтезовано принципі-

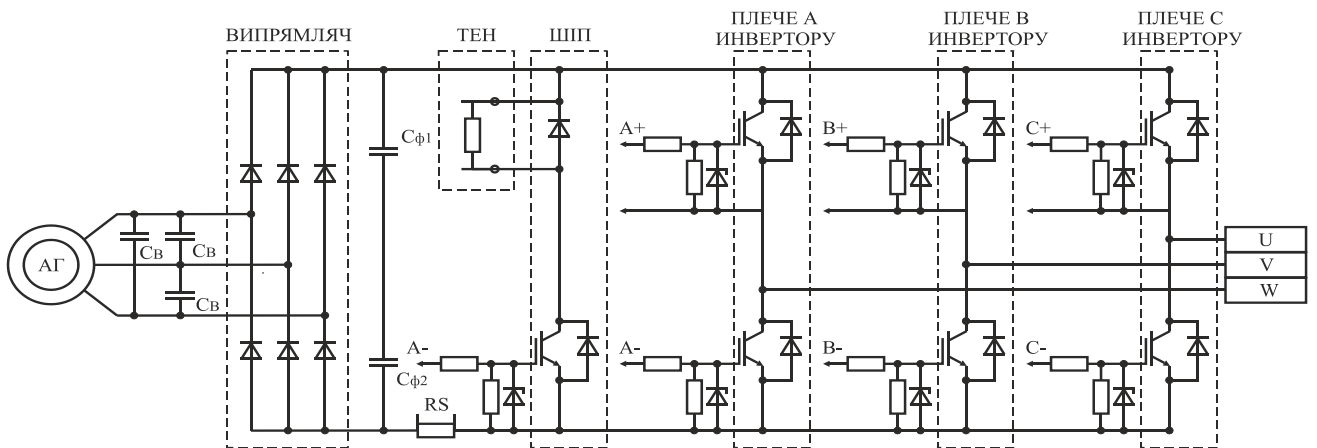


Рис. 6. Принципова електрична схема силової частини комплексу

Третій розділ присвячено розробці математичної моделі роботи електромеханічної системи «Турбодетандер – асинхронний генератор – випрямляч – ІНВ, АІН».

Запропонований комплекс представляє собою взаємопов'язану електромеханічну систему автоматичного регулювання, яка включає в свій склад прилади перетворення різних видів енергії, та забезпечення заданих величин вихідної напруги, частоти та гармонічного складу. При цьому, турбодетандер перетворює енергію газу в механічну енергію обертання валу колеса у відповідності з законами термо- і аеродинаміки; асинхронний генератор перетворює механічну енергію от турбодетандера в електричну у відповідності з законами електромеханічного перетворення енергії в електричній машині. Сукупність силових напівпровідникових приладів перетворює електричну енергію: некерований випрямляч - енергію змінного струму в енергію постійно струму, ІНВ – енергію постійного струму нерегульованої напруги в електричну енергію постійного струму з регульованою напругою, АІН – енергію постійного струму від

випрямляча в енергію змінного струму зі стабілізованим значенням вихідної напруги та необхідним гармонічним складом.

В загальному випадку математична модель електромеханічної системи автоматичного регулювання включає до себе 4 групи рівнянь:

- рівняння механіки;
- рівняння електромеханічного перетворення електричної енергії;
- рівняння силових електричних ланок;
- рівняння керування та ланок зворотних зв'язків.

Кожна з груп рівнянь базується на співвідношеннях тих чи інших складових частин розглядаемого електромеханічного комплексу.

Рівняння механіки в загальному випадку витікають з рівнянь Лагранжа II роду

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \text{ де } i - \text{число ступенів свободи.}$$

Для механічної частки «колесо детандеру – ротор асинхронного генератора» диференційне рівняння руху має вигляд $T_{M\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{\beta_T \omega_{0T} + \beta_G \omega_{0G}}{\beta_T + \beta_G}$, де

$T_{M\Sigma} = \frac{J_\Sigma}{\beta_T + \beta_G}$ – стала часу ланки турбодетандер – ротор асинхронного генератора;

β_T, β_G – відповідно модуль жорсткості лінеаризованої характеристики турбодетандера, та жорсткість механічної характеристики АГ робочої ділянки. Швидкість усталеного режиму, що має місце при $\frac{d\omega}{dt} = 0$ (рис 7), дорівнює

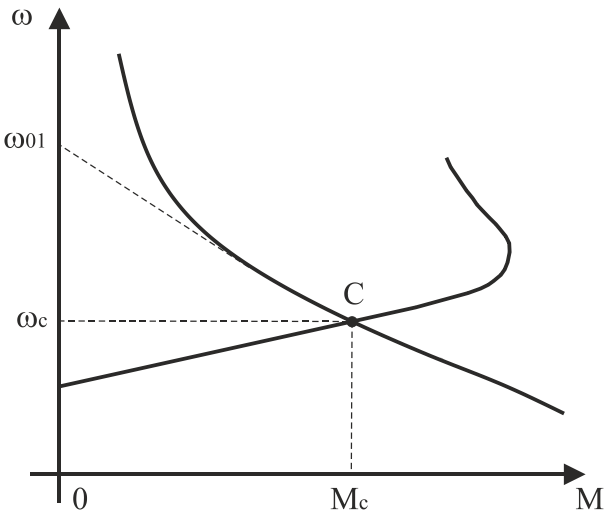


Рис. 7. Механічні характеристики турбодетандера та асинхронного генератора

$$\omega_c = \frac{\beta_T \omega_{0T} + \beta_G \omega_{0G}}{\beta_T + \beta_G} \quad (6)$$

При моделюванні процесу самозбудження АГ для перевірки можливості застосування співвідношень визначення ємностей самозбудження використовувалась система координат з нерухомими вісями α та β відносно статора. Диференційні рівняння для обмотки статора мають вигляд:

$$\begin{aligned} - u_{1\alpha} &= i_{1\alpha} R_1 + L_{s1} \frac{di_{1\alpha}}{dt} + \frac{d\psi_\alpha}{dt} \\ - u_{1\beta} &= i_{1\beta} R_1 + L_{s1} \frac{di_{1\beta}}{dt} + \frac{d\psi_\beta}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

де $u_{1\alpha}, u_{1\beta}$ – проекції напруги статора на вісі α і β відповідно; $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ – проекції струму статора на вісі α і β відповідно; L_{s1} – індуктивність розсіяння статора; ψ_α, ψ_β – проекції вектора головного потокозчеплення машини.

Для обмотки ротора має місце співвідношення:

$$0 = i_{2\alpha} R_2 + L_{s2} \frac{di_{2\alpha}}{dt} + \frac{d\psi_\alpha}{dt} + \omega_p L_{s2} i_{2\beta} + \omega_p \psi_\beta,$$

$$0 = i_{2\beta} R_2 + L_{s2} \frac{di_{2\beta}}{dt} + \frac{d\psi_\beta}{dt} - \omega_p L_{s2} i_{2\alpha} - \omega_p \psi_\alpha,$$
(8)

де $i_{2\alpha}$, $i_{2\beta}$ – проєкції струму ротора по вісі α и β відповідно; L_{s2} – індуктивність роз'язання ротора.

Згідно законів Кирхгофа

$$i_{\mu\alpha} = i_{1\alpha} + i_{2\alpha}, \quad i_{\mu\beta} = i_{1\beta} + i_{2\beta}.$$
(9)

Вплив навантаження та конденсаторів самозбудження враховувалися наступними співвідношеннями:

$$\frac{du_{1\alpha}}{dt} = \frac{i_{C\alpha}}{C}, \quad \frac{du_{1\beta}}{dt} = \frac{i_{C\beta}}{C},$$

$$i_{C\alpha} = i_{1\alpha} - i_{n\alpha}, \quad i_{C\beta} = i_{1\beta} - i_{n\beta},$$
(10)

$$\frac{di_{n\alpha}}{dt} = \frac{u_{1\alpha} - i_{n\alpha} r_n}{L_n}, \quad \frac{di_{n\beta}}{dt} = \frac{u_{1\beta} - i_{n\beta} r_n}{L_n}.$$

Моделювання фізичних процесів на основі системи рівнянь (5-10) з урахуванням початкових умов підтвердило можливість розрахунку ємності самозбудження по виведеним співвідношенням.

Для врахування впливу на електромеханічні процеси імпульсного характеру роботи ШП та АІН побудовано імітаційну комп'ютерну модель системи «Турбодетандер – асинхронний генератор – випрямляч – ШП, АІН». з урахуванням блоку Asynchronous Machine бібліотеки SimPwerSystems, який моделює асинхронну машину в режимах двигуна та генератора. Імітаційне моделювання випрямляча ШП та АІН також було здійснено з використанням тієї ж бібліотеки. Повна імітаційна модель системи наведена на рис. 8.

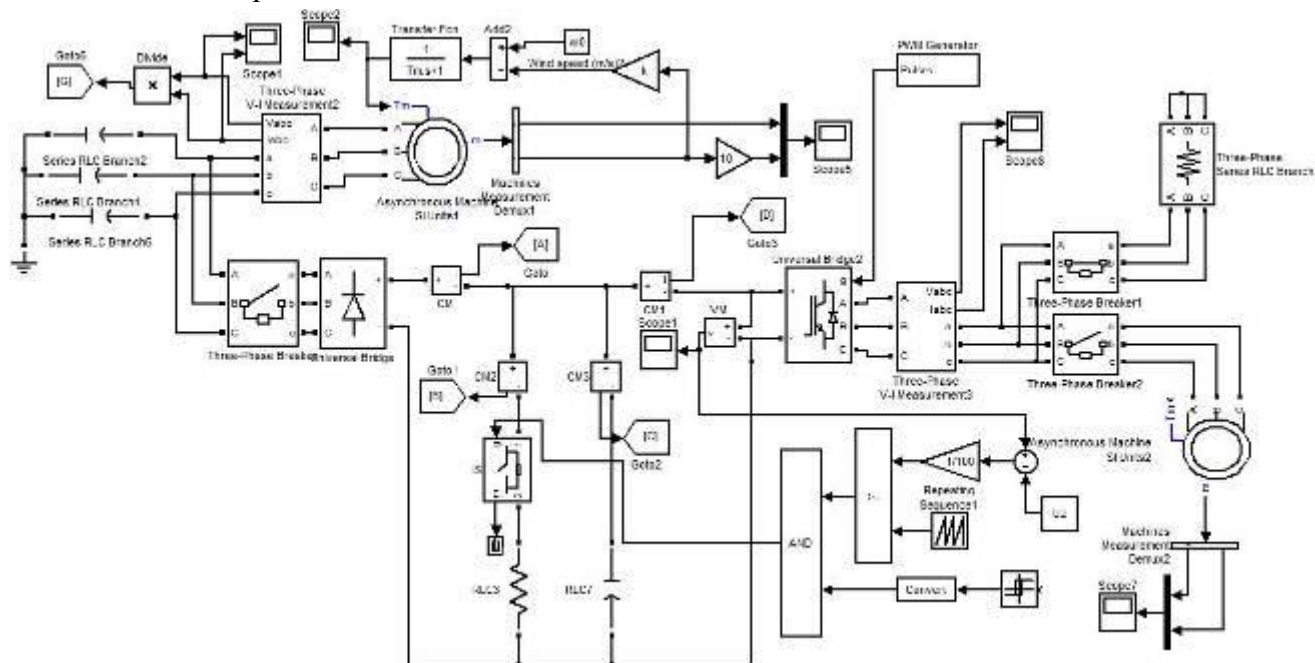


Рис. 8. Повна комп'ютерна модель електротехнічного комплексу

В четвертому розділі виконано імітаційне моделювання робочих режимів, проведено аналіз часових діаграм та перехідних процесів, які характерні для електромеханічного комплексу «Турбодетандер – асинхронний генератор – випрямляч – ШП, інвертор», усталених режимів роботи під навантаженням та перехідних режимів: скид, накид навантаження, зупинка турбодетандера, а також режимів холостого ходу та короткого замикання. Результати моделювання наведені на рис.9-13.

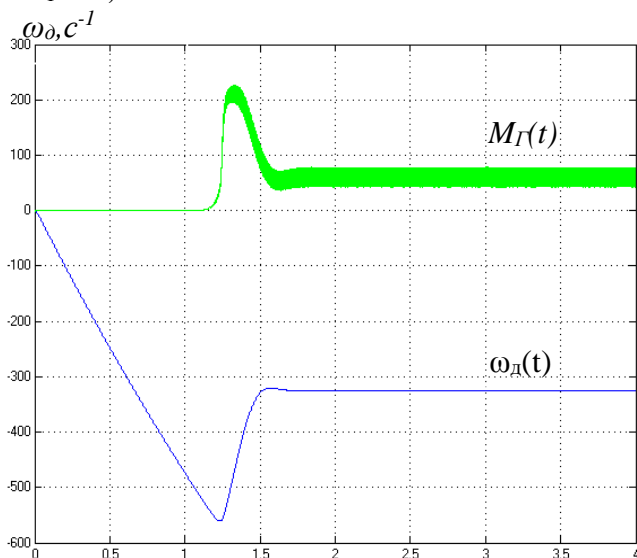


Рис. 9. Швидкість та момент генератора, пуск на х.х. и наброс навантаження при $t = 3c$

на х.х. и наброс навантаження при $t = 3c$ чень $\omega \approx 550c^{-1}$. Часові діаграми показують, що на початку самозбудження напруга вкрай мала, але у кожен наступний момент похідна зростає, це свідчить про лавиноподібний характер самозбудження, який продовжується до $t \approx 1,5c$, після чого зростання напруги сповільнюється. При цьому робоча точка, яка характеризує магнітний стан системи, переходить у стан насичення, яке завершується усталеним значенням напруги генератора, та його струму. Непропорційне значення максимуму току, відносно максимуму напруги генератора пояснюється нелінійністю залежності $E_r = f(I_c)$, та накопленням заряду ємності самозбудження.

Характер часових діаграм повністю відповідає фізиці процесу самозбудження та співпадає з характером відомих з технічної літератури осцилограм.

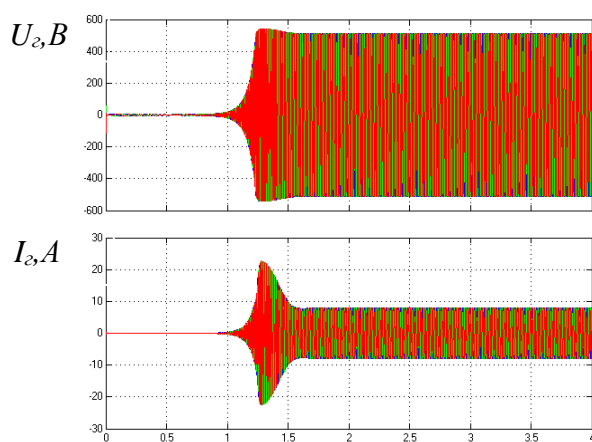


Рис. 10. Графік напруги та струму статора генератора, пуск на х.х. и наброс навантаження при $t = 3c$

інвертор», усталених режимів роботи під навантаженням та перехідних режимів: скид, накид навантаження, зупинка турбодетандера, а також режимів холостого ходу та короткого замикання. Результати моделювання наведені на рис.9-13.

На рис 10 надані часові діаграми пуску джерела. З діаграм видно, що процес самозбудження починається лише після досягнення швидкості достатньої для здійснення лавиноподібного процесу зростання напруги на обмотках статора генератора. Цей процес розпочинається приблизно при $t \approx 1,25c$, коли швидкість досягла значення

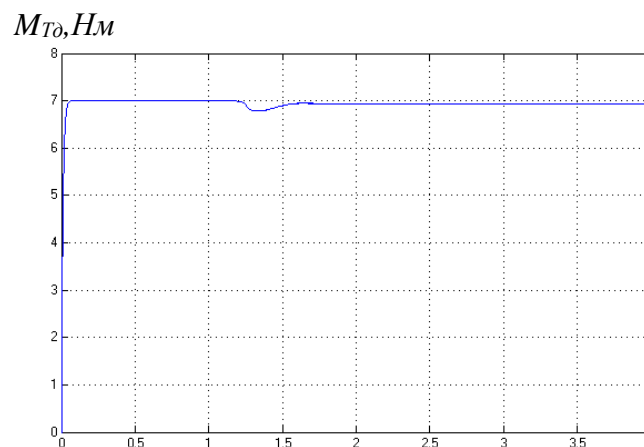


Рис. 11. Момент турбодетандера при пуску на х.х. и набросу навантаження при $t = 3c$

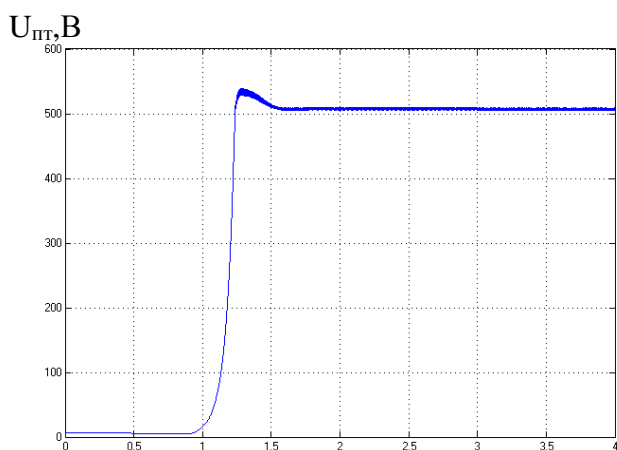


Рис.12. Графік напруги у ланці постійного струму, пуск на х.х. и наброс навантаження при $t=3c$

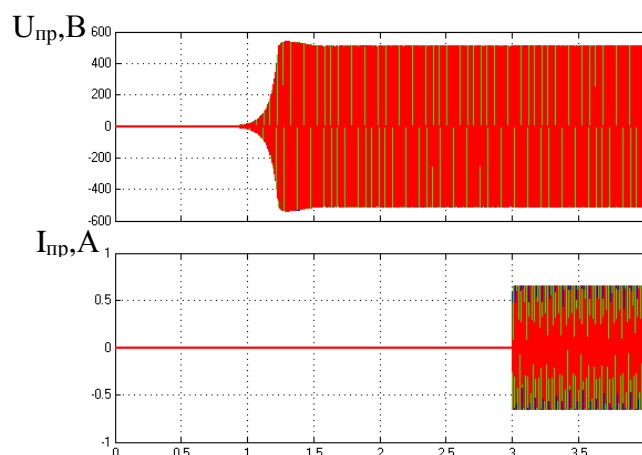


Рис. 13. Графіки напруги та струму на виході перетворювача, пуск на х.х. и наброс навантаження

Перехідні процеси на рис. 12 підтверджують високий рівень стабілізації напруги, та ефективність дії системи автоматичного регулювання напруги. Підключення навантаження інвертора в момент часу $t = 3c$ не призвело до зменшення напруги внаслідок швидкого зменшення баластного навантаження, регульованого ШПП. Таким чином, характер часових діаграм повністю співпадає з фізичною суттю процесів, які протікають в досліджуваній ЕМС, що дозволяє зробити висновки об адекватності комп'ютерної моделі та можливості використання її при подальших дослідженнях.

У п'ятому розділі приведені результати експериментальних досліджень на стенді, схема якого надана на рис. 14. У якості джерела механічної енергії використовувався двигун постійного струму з послабленим магнітним потоком та перетворювачем напруги в цепі якоря. Послаблення потоку збудження зроблено для отримання більш м'якої механічної характеристики, яка близька до механічної характеристики турбодетандера.

У якості асинхронного генератора використовувалась асинхронна машина МТФ 311-6 номінальною потужністю $P_n=11 \text{ кВт}$, швидкістю обертання $n_n=945 \text{ об/хв}$. На рис. 15 наведена функціональна схема шафа детандер-генераторної установки (ДГУ).

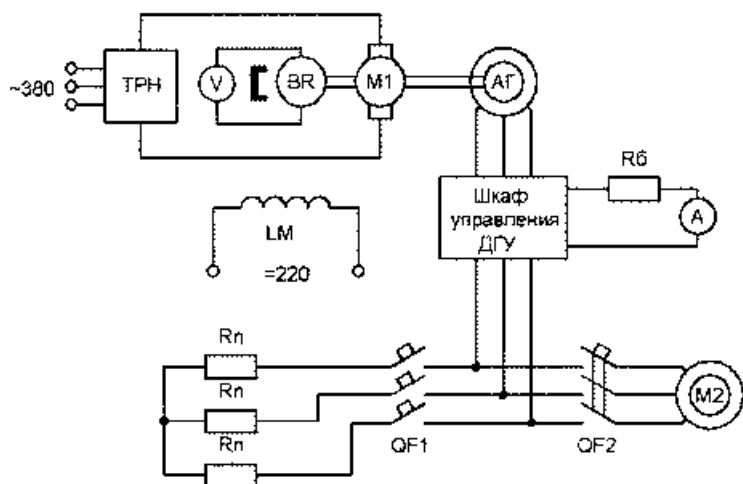


Рис. 14. Схема лабораторної установки

Напруга асинхронного генератора випрямляється випрямлячем, і, в свою чергу, за допомогою автономного інвертора перетворюється в трифазну напругу частотою 50 Гц.

Для перевірки вірності визначеного шляхом комп'ютерного моделювання значення ємності конденсаторів самозбудження на клемі фазних обмоток статора були

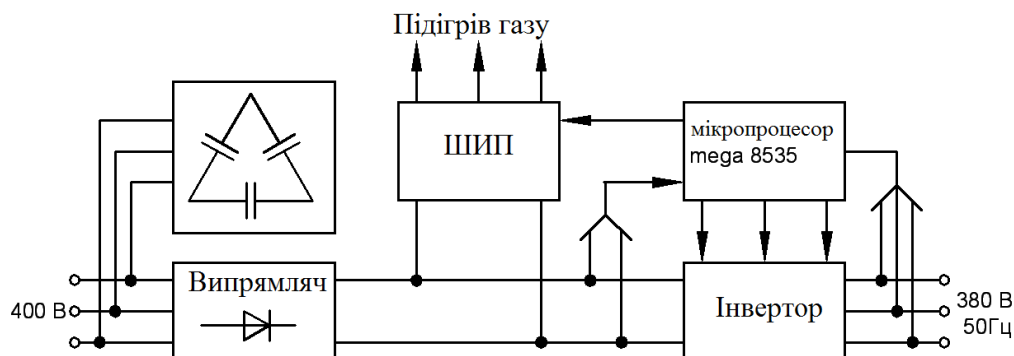


Рис 15. Функціональна схема шкафу ДГУ

підключені конденсатори ємністю по 50 мкФ. У якості теплоелектронагрівальних елементів використовувалась батарея резисторів з опором 15 Ом. В ході лабораторних досліджень, проведених на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи», знімалися осцилограми вхідних та вихідних струмів та напруг на холостому ході і під навантаженням для перевірки проведених розрахунків. Величини струмів, напруг, активної, реактивної та повної потужності фіксувалися за допомогою осцилографа RIGOL та аналізатора мережі DIRIS A20.

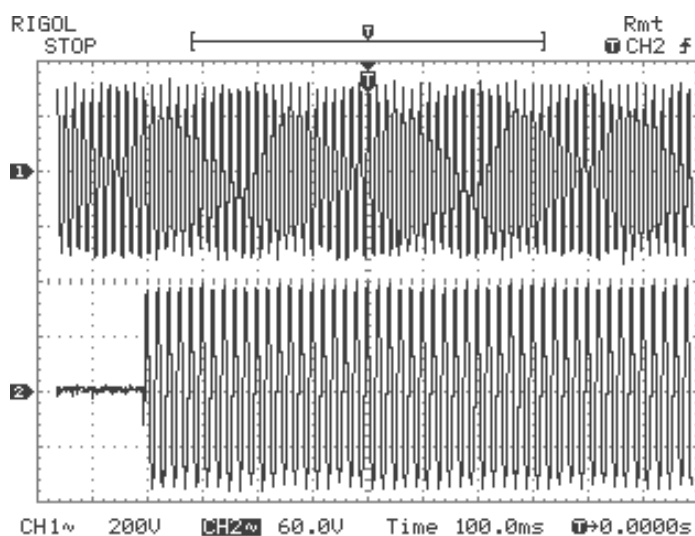


Рис. 16. Вихідний струм та напруга джерела при набросі активного навантаження

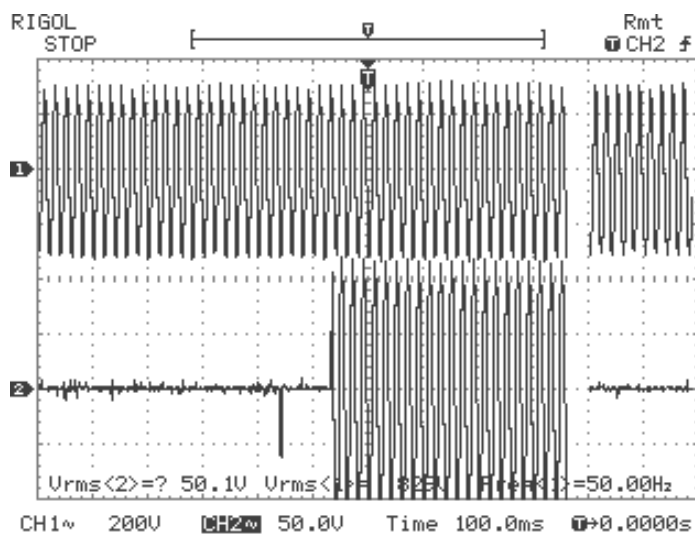


Рис. 17. Вихідний струм та напруга при набросі – сбросі активного навантаження

При холостому ході інвертора асинхронний генератор через випрямляч і ШІП, працював на навантаження, у виді резисторів, імітуючих опір електроТЕНів. Осцилограми струмів та напруг генератора показані на рис. 16-19.

Лабораторні дослідження автономного джерела електроживлення повністю підтвердили працездатність розробленої системи. Визначення частотного спектру вихідної напруги показало, що рівень вищих гармонік, за даними осцилографування, шляхом розкладення у ряд Фур'є, за допомогою програми Matlab показало, що коефіцієнт спотворення дорівнює 0,13, що повністю задовольняє технічним вимогам. Стабільність вихідної напруги оцінювалась відносною похибкою, і не перевищувала 5%.

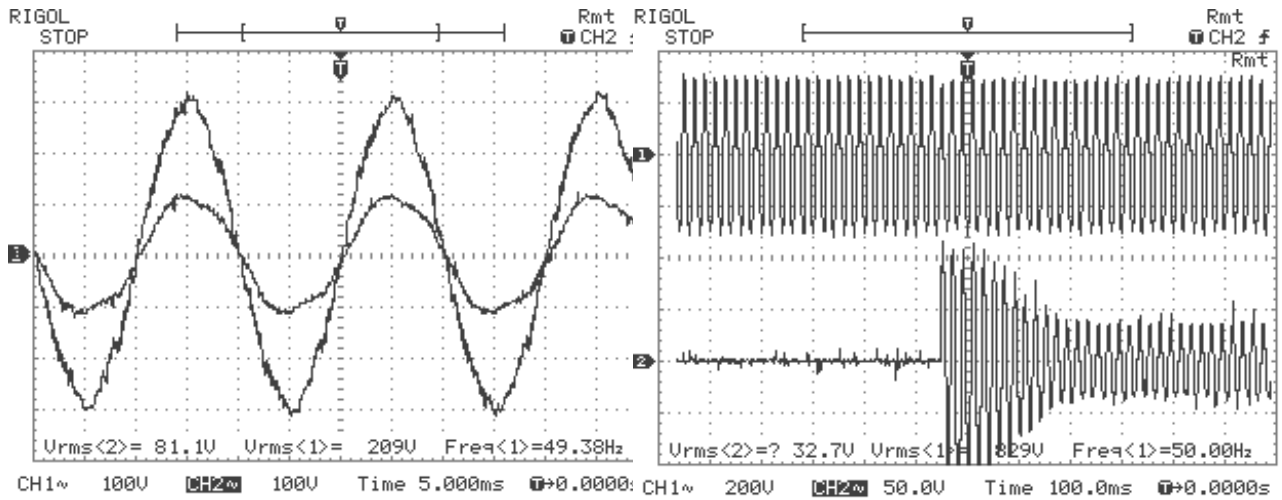


Рис. 18. Вихідний струм та напруга автономного джерела при активному навантаженні

Рис. 19. Вихідний струм та напруга при набросі активно – індуктивного навантаження

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу дослідження та створення джерела електроживлення для ГРС та ГРП у вигляді електромеханічного комплексу «Турбодетандер – асинхронний генератор – випрямляч – широтноімпульсний перетворювач, автономний інвертор», з покращеними техніко-економічними показниками та технічною новизною, підтвердженою патентом.

Основні висновки та рекомендації полягають в наступному:

1. Доведена раціональність побудови, в системах газотранспортування, джерел електроенергії з використанням турбодетандера не тільки на великі потужності (більш 10 кВт), а й для автономних джерел ГРС і ГРП потужністю 5-15 кВт. Співставленням джерел з використанням енергії сонця, вітру та дизель – генератором показано, що виконання автономного джерела на базі турбодетандера забезпечує багатократно менші капітальні та експлуатаційні витрати.

2. Обґрунтовані принципи побудови автономного джерела електроенергії для ГРС та ГРП, що враховують особливості технологічного процесу газотранспортування: зниження тиску і температури газу, необхідність його підігріву для споживача до температури, визначеною технічними умовами, розташування ряду ГРС та ГРП на значній відстані від якісних шляхів, вимоги до надійності електроживлення, якості електроенергії за стабільністю напруги, частоти та викривлення. Внаслідок аналізу були визначені наступні принципи: в якості джерела механічної використати турбодетандер; для перетворення механічної енергії в електричну – асинхронний генератор із самозбудженням; стабілізацію напруги здійснювати регулюванням баластного навантаження, в якості якого використати теплоелектронагрівачі (ТЕН), що підігрівають газ; показники якості напруги забезпечити засобами напівпровідникової техніки.

3. Розроблено методику розрахунку електромеханічного комплексу та вибору його компонентів, з урахуванням багатоступеневого перетворювання енергії: теплової

в механічну, механічної в електричну, електричної змінного струму в електричну постійного, яка у свою чергу перетворюється в імпульсний струм для баластного навантаження та в змінний із заданими показниками для споживача

4. Запропоновано рішення створення автономного джерела у вигляді електромеханічного комплексу «Турбодетандер – асинхронний генератор – випрямляч – широтноімпульсний перетворювач, автономний інвертор напруги». Розроблена функціональна та принципова схема із ковзальним режимом регулювання напруги випрямляча та синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією вихідної напруги інвертора.

5. Одержані співвідношення для визначення в умовах комплексу ємності самозбудження, з урахуванням впливу активного ті індуктивного опорів статорної обмотки та навантаження асинхронного генератора. Комп'ютерним моделюванням, та експериментально, на лабораторному стенді, підтверджена адекватність одержаних співвідношень для практичних розрахунків з точністю до 10%.

6. Створена імітаційна модель досліджуваного комплексу, як нової технічної системи, та проведено його комп'ютерне моделювання у типових нормальних та аномальних режимах, яке довело вірність запропонованих технічних рішень, та забезпечення потрібних технічних вимог.

7. Виконано значний обсяг робіт з комп'ютерного моделювання та фізичного експериментів, які підтвердили вірність прийнятих технічних рішень, теоретичних положень роботи та розроблених методик розрахунків. Чисельні комп'ютерні та експериментальні часові діаграми підтвердили їх відповідність фізичній сутності процесів, що мають місце в створеному електромеханічному комплексі за системою «Турбодетандер – асинхронний генератор із самозбудженням – випрямляч – широтноімпульсний перетворювач, інвертор» із ковзанням режимом стабілізації напруги.

8. Створено дослідно-експериментальний зразок силового електрообладнання електромеханічного комплексу, та проведені його випробування, які підтвердили високу стабільність вихідної напруги (точність $\pm 5\%$), практично абсолютну точність частоти 50 Гц (задаваною за допомогою кварцового резонатора), та якість форми вихідної напруги (коефіцієнт викривлення складає 0,13).

9. Результати дисертаційної роботи впроваджено в ПАТ «Турбогаз» у вигляді 4 виготовлених зразків потужністю 3 та 10 кВт.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Моїсєєв О.М. Дослідження процесів самозбудження в електромеханічній системі «Детандер – Асинхронний генератор – інвертор» / В.Б. Клепиков, В.І. Колотило, О.М. Моїсєєв, Є.Ф. Банєв // Електроінформ. – Львів: ТОВ «Екоінформ». – 2007. – №2. – С. 6 – 8.

Здобувачем виконаний математичний опис роботи асинхронного генератору.

2. Моїсєєв А.Н. Синтез структури источника электроэнергии для газотранспортной сети / В.Б. Клепиков, В.И. Колотило, А.Н. Моїсєєв, Е.Ф. Банєв // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроград-

ського. –Кременчук: КДПУ. – 2007. – Ч.2, вип. 4(45). – С. 29 – 30.

Здобувач брав участь у створенні раціональної структури автономного джерела.

3. Моисеев А.Н. Обеспечение качества выходного напряжения энергосберегающего автономного источника электроэнергии для газотранспортных сетей / В.Б. Клепиков, В.И. Колотило, А.Н. Моисеев, Е.Ф. Банев // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2007. – Тематичний вип. – С. 543 – 544.

Здобувачем запропоновано використання автономного інвертора напруги для стабілізації частоти вихідної напруги.

4. Моисеев А.Н. Лабораторные испытания высокостабильного источника электропитания для газотранспортных сетей / В.Б. Клепиков, В.И. Колотило, А.Н. Моисеев // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2008. – Ч.1, вип. 3(50). – С. 132 – 134.

Здобувач брав участь у створенні лабораторного стенду, складенні плану лабораторних досліджень, та проведенні експериментальних досліджень.

5. Моисеев А.Н. К построению математической модели автономного источника электропитания для газотранспортных сетей по системе „турбодетандер – асинхронный генератор полупроводниковый преобразователь” / А.Н. Моисеев // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2008. – вип. 30. – С. 387-389.

6. Моисеев А.Н. Моделирование динамических режимов автономного источника электропитания по системе «турбодетандер – асинхронный генератор – выпрямитель – ШИП - инвертор» / В.Б. Клепиков, А.Н. Моисеев, П.А. Коротаев // Технічна електродинаміка.– Київ: ІЕДНАУ. – 2009. – Ч.5, Тематичний випуск. – С.102-105.

Здобувач виконав моделювання, та брав участь у аналізуванні отриманих результатів.

7. Моисеев А.Н. К построению математической модели автономного источника электропитания для газотранспортных сетей / А.Н. Моисеев // Матеріали Міжнарод. наук. –практ. конф. [«Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я»], (Харків, 12 – 14 травня 2010 р.) / МОН України, НТУ «ХПІ» [та інші]. – Харків :НТУ «ХПІ», 2010. – Ч.2. – С. 182.

8. Моисеев А.Н. Исследование режима работы асинхронного генератора с самовозбуждением при ненасыщенной магнитной цепи / В.Б. Клепиков, А.Н. Моисеев, А.В. Семиков // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка. – 2011. – №3(79). – С. 286 – 288.

Здобувач обґрунтував, з урахуванням особливостей роботи комплексу правомочність виконання розрахунків ємності самозбудження асинхронного генератора при ненасиченій магнітній ланці.

9. Пат. 41977 Україна, МПК H02P 9/00. Джерело автономного електроживлення для газотранспортних мереж / Клепиков В.Б., Колотило В.И., Моисеев А.Н.; заявник Клепиков Володимир Борисович, Моисеев Олександр Миколайович, Колоти-

ло Віталій Іванович; власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – №u200811140; заявл. 15.09.2008; опубл. 25.06.2009, Бюл. №12.

Здобувач запропонував використовувати широтно-імпульсний перетворювач з баластним навантаженням для стабілізації амплітуди вихідної напруги асинхронного генератора.

АНОТАЦІЇ

Моїсєєв О.М. Електромеханічний комплекс автономного електроживлення з турбодетандером для станцій газотранспортування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2012.

Дисертація присвячена рішенням науково-практичної задачі розробки, створенню та дослідженню автономного джерела електроживлення для газорозподільних станцій та пунктів потужністю до 10 кВт.

Для рішення поставлених задач обґрунтовані принципи побудови енергоресурсозаощаджуючого автономного джерела електроживлення для ГРС и ГРП з урахуванням особливостей технологічного процесу газорозподілу, які пов'язані зі зниженням температури вихідного газу при зниженні його тиску. Розглянуті різні види автономних джерел, визначені їх недоліки, та переваги. На основі принципів побудови автономного джерела запропонована структура та функціональна схема АДЕЖ з турбодетандером та асинхронним генератором, яка забезпечує стабілізацію амплітуди та частоти вихідної напруги.

На кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХПІ» створено опитний зразок системи керування, проведені його лабораторні випробування, отримано патент України на корисну модель.

Розроблене автономне джерело електроживлення встановлено на об'єкті Російської Федерації: ООО «ГАЗПРОМТРАНСГАЗ ВОЛГОГРАД», ЛПУ МГ АГРС-5.

Ключові слова: електромеханічні системи, комплекс автономного електроживлення, турбодетандер, асинхронний генератор, самозбудження.

Моїсєєв А.Н. Электромеханический комплекс автономного электропитания с турбодетандером для станций газотранспортировки. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2012.

В работе обосновывается целесообразность построения автономного источника

электропитания мощностью 5-15 кВт для газораспределительных станций и пунктов, с использованием в качестве источника механической энергии турбодетандера, приводящего в движение асинхронный генератор. Определены принципы построения источника и предложена его функциональная схема, представляющая собой электромеханическую систему «Турбодетандер – асинхронный генератор - выпрямитель – широтно-импульсный преобразователь, автономный инвертор напряжения». Одной из особенностей предложенной функциональной схемы является использование, для стабилизации выходного напряжения, инвертора и широтно-импульсного преобразователя, изменяющего значение балластной нагрузки таким образом, чтоб обеспечить стабилизацию амплитуды выходного напряжения асинхронного генератора. Роль балластной нагрузки, при этом, выполняют тепло-электронагреватели, осуществляющие подогрев газа. Управление ШИП осуществляется с использованием отрицательной обратной связи по выпрямленному напряжению и релейного регулятора, обеспечивающего стабильность выходного напряжения в диапазоне $\pm 5\%$. Высокая стабильность частоты выходного напряжения обеспечивается применением кварцевого резонатора в системе управления инвертора, а требуемый гармонический состав – синусоидальной ШИМ модуляцией.

Разработана методика расчета электромеханического комплекса, выведены соотношения для определения электромеханической постоянной времени динамического звена «Турбодетандер – асинхронный генератор», и определена точка статического равновесия.

В отличие от известной методики определения емкости самовозбуждения, основанной на равенстве напряжения на намагничивающей ветви и напряжения на емкости самовозбуждения, выведены аналитические соотношения для определения емкости самовозбуждения. Полученные соотношения учитывают индуктивности рассеяния обмоток генератора, активное сопротивление обмотки статора, а также сопротивление нагрузки. Компьютерным моделированием и экспериментально подтверждена адекватность полученных соотношений для практических расчетов с точностью 10%

Разработана математическая модель исследуемой системы и компьютерная модель, учитывающая нелинейности схемы и импульсный характер протекающих электромагнитных процессов. Полная компьютерная модель создана с использованием библиотеки SimPwerSystems, программы Matlab.

Выполнено компьютерное моделирование процесса самовозбуждения электромеханического комплекса, приведены характеризующие их временные диаграммы, подтверждающие физическую сущность протекающих процессов.

Теоретические положения работы проверены и подтверждены исследованиями на лабораторном стенде. На основе проведенных исследований и разработок был создан опытно-экспериментальный образец силового оборудования комплекса и проведены его испытания, которые подтвердили: точность поддержания напряжения $\pm 5\%$, частоты 50 Гц, и формы выходного напряжения.

Результаты работы внедрены в ПАТ «Турбогаз» в виде четырех изготовленных образцов мощностью 10 кВт. На источник автономного электропитания для ГРС и ГРП получен патент Украины.

Ключевые слова: электромеханическая система, комплекс автономного электропитания, турбодетандер, асинхронный генератор, самовозбуждение.

Moiseyev A.N. Electromechanical Complex Of Independent Power Supply With Turbodetender For Gas-Transport Stations. – Manuscript.

Candidate Of Technical Sciences' Thesis, Specialty 05.09.03 – Electromechanical complexes and systems. – National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Kharkiv, 2012.

Thesis are devoted to solution of the scientific and practical task related to development, creation and research of independent power supply source for gas-distributing stations and units with capacity 10kW.

In order to solve the stated tasks, the thesis ground principles of development of energy-saving independent power supply source for gas-distributing stations and gas-distributing units taking into account particular features of gas-distribution technological process related to decreasing of output gas temperature when gas pressure drops.

The thesis also demonstrate various types of independent power supply sources with their drawbacks and advantages determined. On the basis of the development principles of independent power supply source, the structure and functional diagram of independent power supply source with turbotendender and induction generator is proposed which ensures stabilizing of output voltage amplitude and frequency.

Experimental model of the control system was developed at the department “Automated Control System” of the National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”. Laboratory tests were performed on the experimental model and patent for the model obtained.

Developed independent power supply source was set into operation at the Russian federation object – “GASROMTRANSGAS VOLGOGRAD” Ltd., LPU MG AGRS-5.

Key words: Electromechanical systems, Turbodetender, independent power supply source, asynchronous generator.



Підписано до друку 31.08.2012 р. Формат видання 145x215.
Формат паперу 60x90 /16.Папір офсетний. Друк – ризографія.
Гарнітура Times New Roman.Умовн. друк. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. №

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16