

Національна академія наук України  
Інститут електродинаміки

**ШИХНЕНКО МАКСИМ ОЛЕГОВИЧ**

УДК 621.313.17

**СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР ПІДВИЩЕНОЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НА  
ОСНОВІ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОЇ МАШИНИ**

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини і апарати

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електродинаміки НАН України (м. Київ)

**Науковий керівник**

- доктор технічних наук, професор  
**Мазуренко Леонід Іванович**,  
Інститут електродинаміки НАН України,  
завідуючий відділу електромеханічних систем.

**Офіційні опоненти:**

- доктор технічних наук, професор  
**Заблудський Микола Миколайович**,  
Національний університет біоресурсів і  
природокористування України МОН України,  
професор кафедри електротехніки,  
електромеханіки і електротехнологій;
- кандидат технічних наук, доцент  
**Прус В'ячеслав В'ячеславович**,  
Кременчуцький національний університет імені  
Михайла Остроградського МОН України,  
доцент кафедри електричних машин та апаратів.

Захист дисертації відбудеться « 06 » квітня 2021 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.03 в Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 03057, Київ – 57, проспект Перемоги, 56, тел. 366-26-45.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України за адресою: 03057, Київ – 57, проспект Перемоги, 56.

Автореферат розісланий « 04 » березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О.В. Бібік

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Електрична машина на сучасних транспортних об'єктах може працювати як в режимі двигуна, так і генератора. В режимі двигуна здійснюється розгін машини з первинним двигуном (газотурбінний двигун, тощо) до заданої частоти обертання, тобто вона працює стартером. Після подачі робочого тіла в первинний двигун і відключенні живлення електрична машина переходить в генераторний режим і працює на мережу транспортного об'єкта. Такі електричні машини відносять до класу стартер-генераторів.

Використання стартер-генераторів дає значну економію в масі пускових пристроїв, так як одна електрична машина виконує функції двигуна і генератора.

Широко використовуються на транспортних об'єктах в якості стартер-генератора машини постійного струму. Це пояснюється простотою регулювання частоти їх обертання в режимі стартера зміною напруги живлення відповідно вимогам до запуску первинних двигунів. Такі стартер-генератори, як і всі машини постійного струму, мають складні конструкцію, і відповідно технологію виготовлення, колекторну систему, що знижує їх експлуатаційну надійність.

На сучасних транспортних об'єктах доцільно використання асинхронних вентильних стартер-генераторів. В стартерному режимі асинхронна машина отримує живлення від акумуляторної батареї (АБ) через напівпровідниковий перетворювач, що працює в режимі автономного інвертора напруги. В генераторному режимі машини перетворювач забезпечує її реактивною потужністю і одночасно працює як випрямляч.

Стартер-генератор також може бути виконаний на базі вентильно-індукторної машини (ВІМ). Перспективність використання ВІМ в якості стартер-генераторів ґрунтується на їх відомих перевагах. Вентильно-індукторна машина представляє собою органічне поєднання індукторної машини та напівпровідникового комутатора. Індукторна машина має більш просту і надійну конструкцію ніж синхронна і асинхронна машини (безобмотковий ротор, зосереджені обмотки на полюсах статора). ККД цієї машини більший ніж ККД асинхронної машини тієї ж потужності.

Питаннями дослідження ВІМ займалися відомі вітчизняні та зарубіжні вчені: Бібік О.В., Бычков М.Г., Голландцев Ю.А., Ильинский Н.Ф., Коломейцев Л.Ф., Красовский А.Б., Кузнецов В.А., Мазуренко Л.І., Николаев В.В., Попов А.Н., Римша В.В., Сінчук О.М., Ткачук В.І., Фисенко В.Г., Kjaer P.C., Krishnan R., Lawrenson P.J., MacMinn S.R., Miller T.J.E., Radun A.V., Stephenson J.M. та ін.

Відомі наукові роботи в яких розглядаються ВІМ в якості стартер-генератора. Однак в цих роботах на недостатньому рівні висвітлені питання, що стосуються характеру протікання електромеханічних процесів в таких стартер-генераторах та впливу на їх енергоефективність параметрів та особливостей керування в стартерному і генераторному режимах. Тому задача, що вирішується в дисертаційній роботі, є актуальною.

Для дослідження вентильно-індукторних стартер-генераторів (ВІСтГ) необхідно розробити ефективні математичні та імітаційні моделі, сформулювати підходи до керування, щоб забезпечити необхідні їх статичні і динамічні показники.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувались в Інституті електродинаміки НАН України відповідно до планів досліджень НАН України за темами: «Розробка засобів

покращення технічних характеристик електроенергетичного обладнання на основі оптимізації електромеханічних, електромагнітних і теплових процесів» (шифр «Об'єкт-2», № ДР 0112U008207); «Провести дослідження та розробити технічні рішення для підвищення надійності електромеханічного обладнання електричних станцій» (шифр «Агрегат», № ДР 0115U004399); «Створення науково-технічних основ інтелектуалізації технологічних процесів та засобів вимірювання, керування, моніторингу і діагностування в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр «ІНТЕХЕН», № ДР 0118U005367); «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр «ІНТЕХЕН-2», № ДР 0118U005367).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення математичної моделі для аналізу режимів і обґрунтування принципів формування перехідних і квазіусталених електромагнітних процесів вентильно-індукторних стартер-генераторів для підвищення їх енергоефективності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

- проаналізувати системи запуску двигунів та електроживлення на об'єктах, де вони встановлюються, з метою визначення необхідних критеріїв щодо стартер-генераторів та їх сучасного стану на транспортних засобах;
- провести аналіз робіт, пов'язаних з розробкою і дослідженням ВІСтГ;
- розробити математичну та імітаційну моделі ВІМ в якості стартер-генератора з врахуванням особливостей роботи з АБ і змінним навантаженням для дослідження електромеханічних процесів, аналізу ефективності та відповідності показників якості енергії встановленим стандартам;
- визначити характер протікання електромеханічних процесів ВІСтГ;
- розробити принципи регулювання вихідної напруги ВІСтГ в генераторному режимі;
- розробити алгоритми керування ВІСтГ в стартерному режимі, що забезпечують підвищення енергоефективності пускових процесів;
- розробити та створити експериментальний зразок ВІСтГ;
- провести експериментальні дослідження ВІСтГ для підтвердження адекватності розроблених математичної та імітаційної моделей.

*Об'єкт дослідження:* перехідні та квазіусталені процеси вентильно-індукторних стартер-генераторів.

*Предмет дослідження:* математична модель та принципи формування перехідних і квазіусталених електромагнітних процесів в вентильно-індукторних стартер-генераторах.

**Методи дослідження.** Вирішення поставлених у дисертаційній роботі задач ґрунтується на математичному, імітаційному і фізичному моделюванні, методах скінченних елементів, апроксимації залежностей індуктивності, комутаційних функцій перемикавання, розкладання періодичних сигналів в ряд Фур'є, чисельних методах обробки результатів.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Розвинуто теорію електромеханічних перетворювачів енергії в напрямку вентильно-індукторних машин шляхом наукового обґрунтування принципів формування перехідних і квазіусталених електромагнітних процесів за зміни

параметрів і алгоритмів керування в режимах двигуна і генератора, що забезпечило вдосконалення їх систем керування та підвищення енергоефективності.

2. Вдосконалено математичну модель вентильно-індукторного стартер-генератора, що базується на диференціальних і алгебраїчних рівняннях контурів статора, електромагнітного моменту, руху, залежностях індуктивності від кута повороту ротора та струму фази, в якій додатково використовуються розроблені логічні вирази для визначення стану напівпровідникових елементів вентильного перетворювача та рівняння зв'язку між цим перетворювачем, індукторною машиною та елементами кола постійного струму та враховуються втрати в сталі і механічні втрати, що дало змогу дослідити особливості квазіусталених і перехідних процесів як в стартерному так і в генераторному режимах.

3. Вперше за допомогою запропонованої математичної моделі науково обгрунтовано вплив параметрів вентильно-індукторного стартер-генератора, акумуляторної батареї і обмеження фазного струму на енергетичні показники стартерного режиму та встановлено, що вибір акумуляторної батареї з внутрішнім опором  $(1/2 \dots 1/8)R_{AB(ном)}$ , коефіцієнта широтно-імпульсного регулювання фазної напруги в межах  $0,7 \dots 0,9$  або обмеження фазного струму на рівні  $(1,2 \dots 5)i_{\phi(max)(ном)}$  дає змогу формувати перехідні електромагнітні процеси і знизити споживання енергії від акумуляторної батареї відповідно на  $1 \dots 5 \%$ ,  $3 \dots 11 \%$  та  $5 \dots 21 \%$ , відносно номінальних значень і підвищити енергоефективність стартерного режиму.

4. Вперше науково обгрунтовано вплив параметрів і обмеження фазного струму на квазіусталені та перехідні процеси генераторного режиму вентильно-індукторного стартер-генератора та встановлено, що збільшення рівня обмеження фазного струму від значення, що відповідає холостому ходу генератора, на один порядок дозволяє знизити тривалість збудження на два порядки, а зменшення ємності конденсатора в колі постійного струму від  $2C_{min}$  до  $0,05C_{min}$ , вибір акумуляторної батареї з електрорушійною силою  $(1/2 \dots 1/4)E_{AB(ном)}$  або з внутрішнім опором  $(2 \dots 8)R_{AB(ном)}$  забезпечує зниження витрат енергії акумуляторної батареї при збудженні відповідно в  $2,2 \dots 57,9$ ,  $4,3 \dots 19,2$  та  $1,1 \dots 1,6$  рази відносно номінальних значень. Обгрунтовано мінімальну величину ємності конденсатора  $C_{min}$  в колі постійного струму, яка забезпечує відповідність якості вихідної напруги генератора стандартам.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено імітаційні моделі ВІСтГ, які враховують нелінійність магнітної системи, дискретність роботи вентильного перетворювача (ВП), механічні втрати, втрати в сталі і обмотках, особливість навантаження первинного двигуна та параметри акумуляторної батареї.

2. Розроблено рекомендації щодо принципів керування ВІСтГ в стартерному режимі, що дозволило зменшити тривалість пускових процесів, витрати енергії АБ та знизити різкі стрибки фазних струмів та струмів АБ.

3. Розроблено рекомендації щодо керування ВІСтГ в генераторному режимі при збудженні і зміні навантаження, які забезпечили відхилення рівня вихідної напруги не більше  $1 \dots 2 \%$  від номінального її значення для всього діапазону навантажень та дозволили досягти зменшення тривалості перехідних процесів.

4. Розроблено дослідний експериментальний зразок ВІСтГ та проведено його експериментальні дослідження в стартерному та генераторному режимах. Отримані робочі характеристики ВІСтГ в генераторному режимі підтверджують ефективність

запропонованих принципів регулювання його вихідної напруги зміною максимального значення фазного струму.

5. Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри електротехніки та електроприводу Київського національного університету будівництва і архітектури та кафедри електромеханічного обладнання енергоємних підприємств Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут» імені Ігоря Сікорського.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто на основі самостійних досліджень, узагальнень і висновків. У дисертації не використовувались ідеї і розробки, що належать співавторам, з якими є спільно опубліковані наукові праці.

В наукових працях, які були опубліковані в співавторстві, здобувачеві належать: в [1] – проведення експериментальних досліджень та їх порівняння з результатами математичного моделювання ВІМ; [2] – дослідження та аналіз процесів збудження вентильно-індукторного генератора; [3] – дослідження та аналіз перехідних процесів за зміни навантаження і якості електроенергії ВІГ; [4] – формування енергоефективних режимів вентильно-індукторного двигуна за зміни кутів комутації, уточнення математичної моделі за рахунок використання нелінійних залежностей часткової похідної фазної індуктивності за кутом повороту ротора для визначення електромагнітного моменту фази; [5] – розрахункові дослідження та синтез алгоритму формування механічної характеристики вентильно-індукторного двигуна; [6] – розрахункові дослідження процесів ВІСтГ в стартерному режимі при живленні від АБ за зміни параметрів, аналіз результатів; [7] – експериментальні дослідження ВІСтГ при регулюванні рівня фазного струму, дослідження робочих характеристик, визначення показників якості електроенергії, аналіз результатів; [8] – запропоновано датчик положення ротора виставляти з максимально можливим випередженням формування сигналу подачі напруги на фазу двигуна, забезпечуючи максимально можливу частоту обертання; [9] – розроблення математичної моделі ВІМ для аналізу режимів двигуна і генератора та підходів до стабілізації вихідної напруги, розрахункові дослідження; [10] – запропоновано сфери застосування ВІГ, розроблено схему системи керування; [11] – аналіз геометричних конфігурацій і конструктивних виконань ВІМ, запропоновано імітаційну модель та алгоритми керування ВІМ в режимі двигуна та генератора.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідалися на 3-х міжнародних конференціях, а саме: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління – Автоматика–2017 (м. Київ, 2017 р.); Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених – БУД-МАЙСТЕР-КЛАС-2017 (м. Київ, 2017 р.); IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems – IEPS (м. Харків, 2018 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи відображено у 11 наукових працях, з них 7 опубліковані у наукових фахових виданнях України, 3 у збірниках наукових конференцій, 1 – патент України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота викладена на 205 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 5 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 166 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 5 таблицями

та 94 рисунками. Список використаних джерел містить 117 найменувань, з них 55 кирилицею та 62 латиницею.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, відображено зв'язок з науково-дослідними роботами, визначено мету та завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У **першому** розділі проведено аналіз систем запуску поршневих двигунів внутрішнього згорання та газотурбінних двигунів транспортних засобів. Визначено, що хоча електричні системи запуску по масогабаритним показникам поступаються повітряним, вони являються найбільш часто вживаними з огляду на високу надійність і зручність керування пусковими процесами.

Аналіз систем електроживлення транспортних засобів показує, що все більша їх електрифікація призводить до зростання споживаної потужності, ускладнення електричних мереж, збільшення їх маси і протяжності проводів. В авіації ця проблема вирішується зокрема підвищенням напруги живлення. Тенденцією розвитку сучасних повітряних суден являється застосування для системи постійного струму напруги 270 В окрім розповсюдженої 28 В. Подальший розвиток таких систем створює сприятливі умови для використання стартер-генераторів на основі електричних машин, що живляться від джерел постійної напруги, до яких відносяться і вентильно-індукторні машини.

Розглянуто електричні стартери і генератори, що використовуються в автономних енергоустановках газотурбінних та дизельних електростанцій, допоміжних силових установках транспортних засобів, ГТД літаків. З'ясовано, що зазвичай в таких об'єктах застосовуються окремо стартери і генератори. В якості стартер-генераторів в основному використовуються машини постійного струму. Відомі роботи, в яких стартер-генератор був спроектований на основі асинхронної машини. Альтернативою стартер-генераторам на основі машини постійного струму і асинхронної машини являються вентильно-індукторні стартер-генератори. Використання ВІМ в якості стартер-генераторів є перспективним з огляду на ряд його переваг: безобмотковий ротор, концентрична обмотка на статорі, відсутність ковзних контактів, вище значення ККД та ін.

Аналіз наукових робіт, які присвячені дослідженню вентильно-індукторних машин, показав, що ВІМ розглядалися в якості стартер-генератора, проте їх робота в складі автономних енергоустановок при живленні від АБ, їх енергетичні показники при пуску не досліджувались. Відомо мало робіт присвячених дослідженню ВІМ в режимі генератора, більшість із них мають поверхневий характер, не відомі дослідження процесів збудження, перехідних процесів при зміні навантаження та показників якості електричної енергії ВІСтГ.

В результаті проведеного аналізу математичних та імітаційних моделей для дослідження процесів в вентильно-індукторних машинах встановлено, що для врахування нелінійності магнітної системи, підтримання високої точності та швидкості розрахунків варто комбінувати польові математичні моделі з диференційними рівняннями теорії електричних кіл.

У **другому** розділі наведено розроблену математичну модель вентильно-індукторного стартер-генератора що складається з моделей індукторної машини (ІМ),

вентильного перетворювача (ВП), елементів кола постійного струму, системи керування (СК) та умов переходу із стартерного режиму в генераторний і навпаки.

Математична модель ІМ представлена рівняннями контурів статора, електромагнітного моменту, руху та кута повороту ротора. Модель враховує нелінійність магнітної системи за рахунок використання залежності індуктивності від фазного струму та кута повороту, яка отримана із розрахунку машини польовими методами.

Математична модель системи керування складається із виразів, котрі визначають керуючі сигнали, за якими встановлюється стан напівпровідникових елементів ВП. Керуючий вплив СК визначається дією логічних сигналів СК за кутами та пороговим значенням фазного струму

$$G_{(n)} = G_{\theta(n)} \wedge G_{i(n)}, \quad (1)$$

де  $G_{\theta(n)}$  та  $G_{i(n)}$  – логічні сигнали СК за кутами та пороговим значенням фазного струму, що визначаються наступним чином

$$G_{\theta(n)} = \begin{cases} \text{if } \theta_{\phi(n)} \geq \theta_{\text{вм}} \wedge \theta_{\phi} \leq \theta_{\text{вим}}; G_{\theta(n)} = 1; \\ \text{if } \theta_{\phi(n)} > \theta_{\text{вим}}; G_{\theta(n)} = 0; \\ \text{if } \theta_{\phi(n)} < \theta_{\text{вм}}; G_{\theta(n)} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$G_{i(n)} = \begin{cases} \text{if } i_{\phi(n)} < i_{\phi(\text{max})}^*; G_{i(n)} = 1; \\ \text{if } i_{\phi(n)} \geq i_{\phi(\text{max})}^*; G_{i(n)} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

де  $\theta_{\text{вм}}$  – кут вмикання;  $\theta_{\text{вим}}$  – кут вимикання фази;  $i_{\phi(\text{max})}^*$  – задане порогове значення фазного струму.

В залежності від обраного алгоритму кути комутації  $\theta_{\text{вм}}$  та  $\theta_{\text{вим}}$ , а також максимальне значення фазного струму  $i_{\phi(\text{max})}^*$  можуть бути як постійними, так і змінними величинами.

Математична модель ВП складається з рівнянь зв'язку струмів та напруг. Якщо припустити, що елементи ВП ідеальні, то фазна напруга, в залежності від режиму роботи ВІМ, визначається напругою кола постійного струму  $U_d$  (4) або напругою акумуляторної батареї  $U_{AB}$  (5)

$$U_{\phi(n)} = k_{\phi(n)} \cdot U_d, \quad (4)$$

$$U_{\phi(n)} = k_{\phi(n)} \cdot U_{AB}. \quad (5)$$

де  $k_{\phi(n)}$  – коефіцієнт, що відображає полярність напруги фази відносно напруги кола постійного струму (при підключенні через транзистори  $k_{\phi(n)}=1$ , при комутації через зворотні діоди  $k_{\phi(n)}=-1$ , при відсутності струму через діоди  $k_{\phi(n)}=0$ ).

Струм в колі постійної напруги  $i_d$  – це сума складових фазних струмів

$$i_d = \sum_{n=1}^m k_{\phi(n)} \cdot i_{\phi(n)}, \quad (6)$$

де  $i_{\phi(n)}$  – струм  $n$ -ї фази, полярність якого визначається коефіцієнтом  $k_{\phi(n)}$

$$k_{\phi(n)} = \begin{cases} \text{if } G_{(n)} = 1; k_{\phi(n)} = 1; \\ \text{if } G_{(n)} = 0; i_{\phi(n)} > 0; k_{\phi(n)} = -1; \\ \text{if } G_{(n)} = 0; i_{\phi(n)} = 0; k_{\phi(n)} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

де  $G_{(n)}$  – логічний сигнал підключення фази до конденсатора  $C$  кола постійного струму ( $G_{(n)}=1$  – фаза підключена через транзистори;  $G_{(n)}=0$  та  $i_{\phi(n)}=0$  – фаза відключена;  $G_{(n)}=0$  та  $i_{\phi(n)}>0$  – підключення фази через зворотні діоди).

Струми елементів ВП визначаються за сигналами СК – для  $n$ -ї фази струми транзистора  $i_{mp(n)}$  та діода  $i_{d(n)}$  встановлюються за (8) та (9) відповідно

$$i_{mp(n)} = G_{(n)} \cdot i_{\phi(n)}; \quad (8)$$

$$i_{d(n)} = \overline{G_{(n)}} \cdot i_{\phi(n)}. \quad (9)$$

Наведено способи визначення та врахування втрат в індукторній машині при розрахунку процесів ВІСтГ. Стосовно електричних і механічних втрат застосовано відомі підходи. Запропоновано підхід до врахування магнітних втрат ІМ у вигляді еквівалентного струму, напрямок якого відповідає фазній напрузі та визначається відповідно запропонованим логічним виразами.

Розроблено алгоритми розрахунку процесів ВІМ в генераторному та стартерному режимах. На основі рівнянь математичної моделі та алгоритмів розрахунку в середовищі Matlab Simulink створено імітаційну модель ВІМ.

Математична та імітаційна моделі враховують характер навантаження компресора ГТД, параметри АБ та дозволяють розраховувати перехідні та квазіусталені процеси ВІСтГ, реалізовувати різноманітні алгоритми керування як в стартерному, так і в генераторному режимах.

У **третьому** розділі представлено результати чисельних досліджень стартерного режиму ВІСтГ при живленні від АБ у випадку прямих пусків та при обмеженні рівня фазного струму. Розрахунки виконано для ВІМ з наступними номінальними даними та параметрами: номінальні потужність, напруга і частота обертання відповідно 3 кВт, 28 В і 3000 об/хв,  $C=0,8976$  Ф,  $R_C=1,25 \cdot 10^{-4}$  Ом,  $J_C=0,1$  кг·м<sup>2</sup>,  $E_{AB}=28$  В,  $R_{AB}=0,02$  Ом,  $\theta_{вм}=45^\circ$ ,  $\theta_{взм}=75^\circ$ , де  $C$  та  $R_C$  – відповідно ємність та внутрішній опір конденсаторної батареї;  $J_C$  – сумарний момент інерції;  $E_{AB}$ ,  $R_{AB}$  – відповідно ЕРС та внутрішній опір АБ.

На рисунку 1 наведено осцилограми перехідних процесів при прямому пуску ВІСтГ за номінальних параметрів. Миттєві значення електромагнітного моменту ВІСтГ в момент пуску досить значні (рис. 1, а), в порівнянні з номінальними, що викликає ударний вплив на кінематику приводу. Величина електромагнітного моменту визначається фазними струмами (рис. 1, б), амплітудні значення яких залежать від проти-ЕРС, яка визначається рівнем напруги живлення та втратами в обмотках. В початковий момент пуску проти-ЕРС відсутня і струм фази різко зростає з огляду на низьку індуктивність фази. Різкий стрибок струмів фаз викликає відповідну зміну струму АБ (рис. 1, в), так як його величина пропорційна фазним струмам, та просадку напруги АБ (рис. 1, г), внаслідок чого, фазні струми знижуються.

Момент опору під час пуску зростає від 0 до 1,32 Н·м в залежності від частоти обертання. Стрибок фазних струмів на початку пуску викликає появу пускового електромагнітного моменту, середнє значення якого значно перевищує момент опору (рис. 2, а). В результаті частота обертання різко зростає, що найбільш помітно на інтервалі першого імпульсу фазного струму (рис. 2, б). По мірі розкручування ротора середнє значення електромагнітного моменту зменшується і частота обертання зростає відповідно механічній характеристиці, яка характерна для двигуна постійного

струму послідовного збудження. Значне прискорення ротора, викликане надлишком потужності, дозволяє розігнати стартер до заданої частоти обертання за 0,33 с.

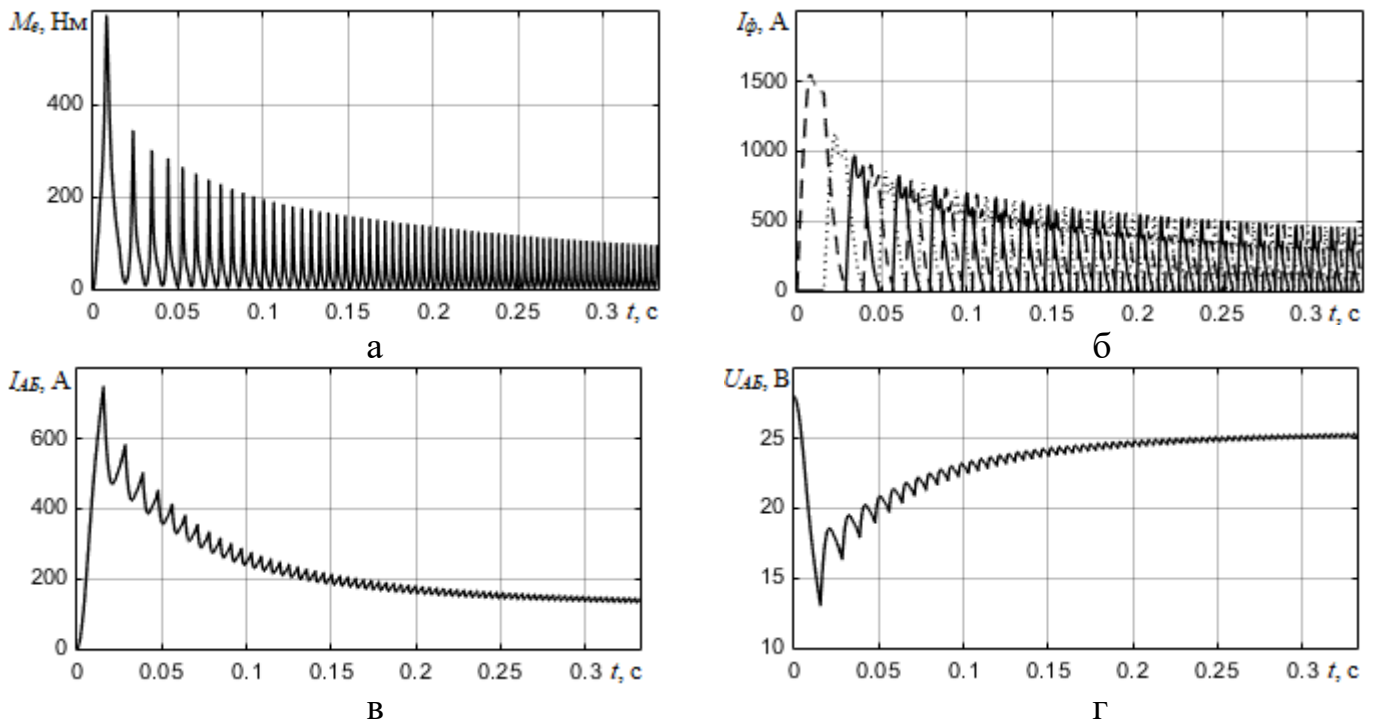


Рис. 1 Часові залежності електромагнітного моменту (а), фазних струмів (б), напруги (в) та струму АБ (г) в стартерному режимі ВІСтГ у випадку прямого пуску

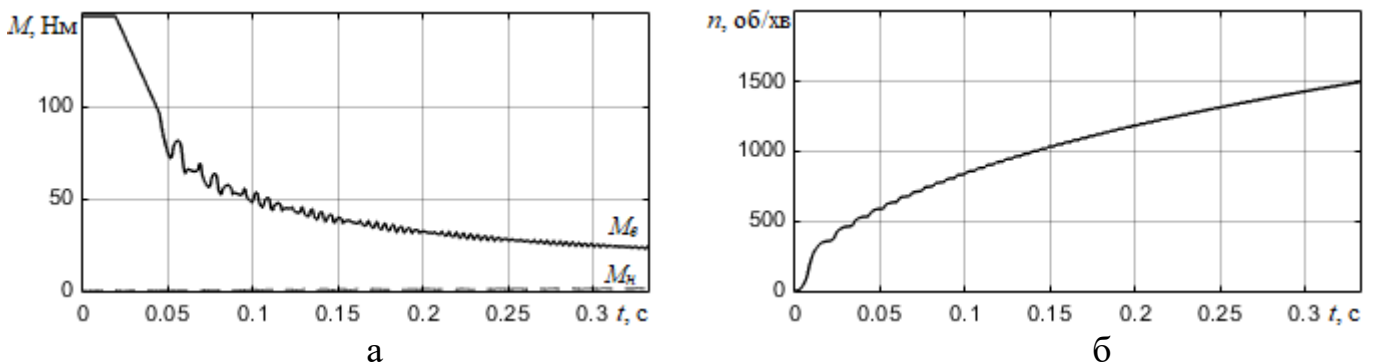


Рис. 2 Часові залежності середнього електромагнітного моменту  $M_e$  (а), моменту опору  $M_n$  (а) та частоти обертання (б) в стартерному режимі ВІСтГ у випадку прямого пуску

Миттєва потужність навантаження АБ різко зростає від нуля до максимального значення відповідно струму навантаження та зменшується при зростанні частоти обертання ротора ВІСтГ. Середня її величина під час пуску складає  $P_{AB(ном)}=5,14$  кВт. Загальні витрати енергії АБ становлять  $W_{AB(ном)}=2067$  Дж, які розподіляються на корисну  $W_{VICmГ}$  енергію витрачену на запуск ВІСтГ  $W_{VICmГ(ном)}=1708$  Дж, та втрати акумуляторної батареї  $W_{вт(ном)}=359$  Дж.

Прямі пуски ВІСтГ можуть бути небезпечними для приводного двигуна і його системи передачі, для електричної машини та ВП. Високі значення величини фазних струмів призводить до значного нагріву стартера і вимагає застосування АБ та ключів ВП, що розраховані на відповідні розрядні струми. Таким чином важливе значення

має встановлення значень параметрів ВІСтГ та АБ, які дозволяють знизити фазні струми, струм АБ. Крім того, вони повинні забезпечувати підвищення енергоефективності пускових процесів.

Досліджено вплив моменту інерції, ємності конденсаторів у колі постійного струму ВП, внутрішнього опору та ЕРС акумуляторної батареї, кутів комутації та широтно-імпульсного регулювання (ШІР) фазної напруги на протікання процесів пусків ВІСтГ без обмеження фазного струму.

Показано, що тривалість пуску ВІСтГ зменшується пропорційно зменшенню моменту інерції (на 0,33...0,35 с при зменшенні  $J_C$  на  $0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ) та зростає за гіперболічною залежністю при зменшенні коефіцієнту заповнення ШІР фазної напруги (в 1,3...4,6 разів при зменшенні цього коефіцієнту в межах від 0,9 до 0,7). Зменшення тривалості в 3,5 рази та на 15...29 % і 20...43 % досягається при збільшенні ЕРС акумуляторної батареї в 2 рази, зменшенні внутрішнього опору АБ від  $1/2$  до  $1/8 R_{AB(\text{ном})}$  і зменшенні кутів комутації на 3...9°.

Зниження фазних струмів ВІСтГ на 33...58 %, в 2 та 1,1...4,5 разів можна досягти за рахунок збільшення внутрішнього опору АБ в 4...8 разів (рис. 3, а), зниження ЕРС акумуляторної батареї в 2 рази (рис. 3, в) та зменшення коефіцієнта заповнення ШІР фазної напруги від 0,9 до 0,62 (рис. 3, д).

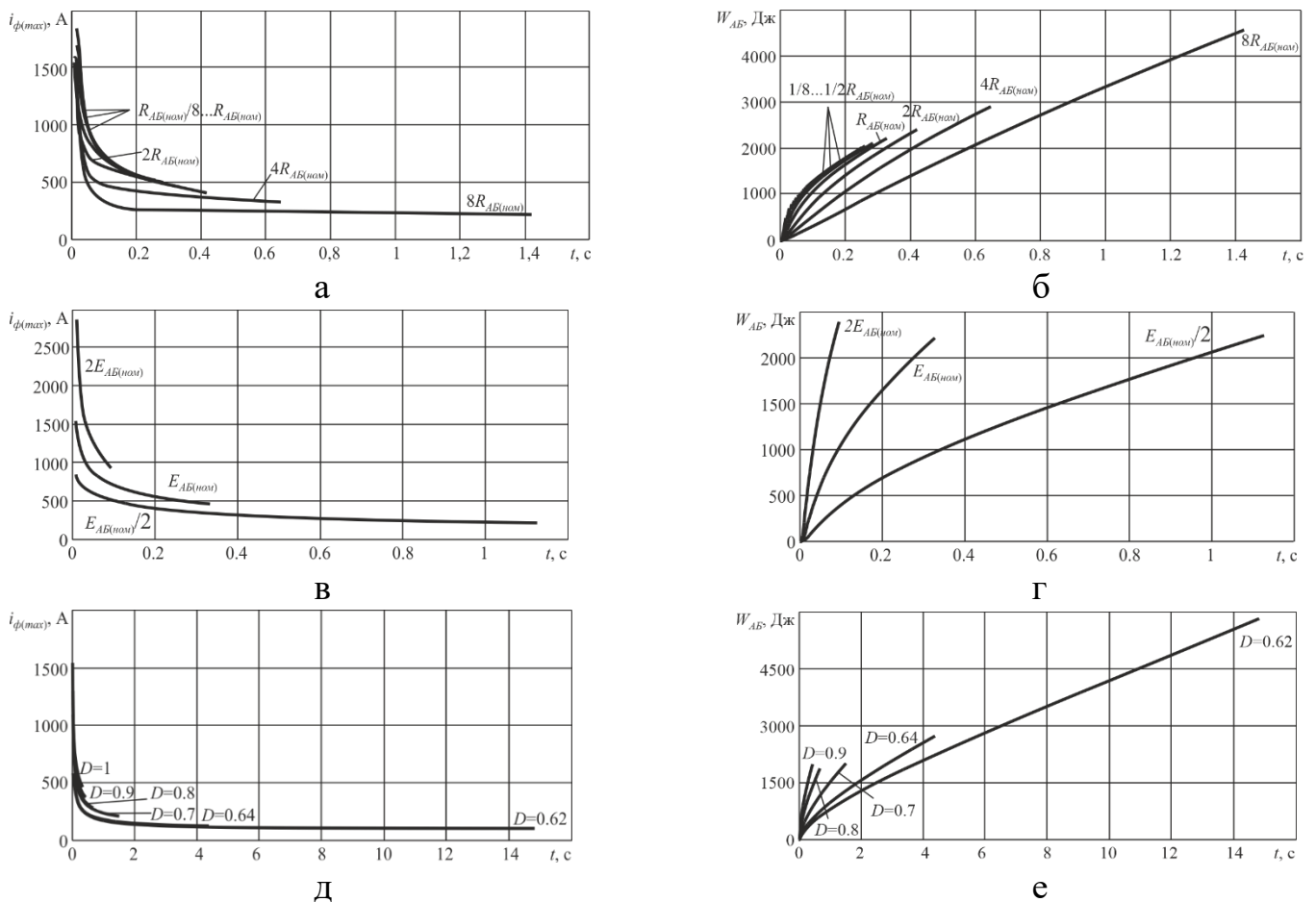


Рис. 3 Пуски ВІСтГ без обмеження рівня фазного струму при зміні внутрішнього опору (а, б) та ЕРС акумуляторної батареї (в, г), коефіцієнта заповнення ШІР фазної напруги (д, е)

Зниження струму та потужності навантаження АБ досягається шляхом зменшення моменту інерції, збільшення ємності конденсаторів та внутрішнього опору АБ, зниження ЕРС акумуляторної батареї та коефіцієнта заповнення ШІР фазної напруги, зсуву зони комутації в сторону збільшення кутів.

Витрати енергії АБ під час пуску зменшуються пропорційно зменшенню моменту інерції (на 2067...2307 Дж при зменшенні  $J_C$  на 0,1 кг·м<sup>2</sup>). Зниження витрат енергії на 1...5 % та 3...11 % досягається за рахунок вибору акумуляторної батареї з внутрішнім опором  $(1/2...1/8)R_{AB(ном)}$  (рис. 3, б) та коефіцієнта ШІР фазної напруги в межах 0,7...0,9 (рис. 3, е). При збільшенні ємності конденсатора кола постійного струму в межах 0,1...1 Ф витрати АБ зменшуються від 2484 до 2057 Дж.

Для ряду виконань ВІСтГ використання прямих пусків і пусків з ШІР фазної напруги є доцільним з огляду на простоту їх реалізації. Їх застосування являється задовільним для систем запуску в яких встановлена АБ великої ємності, а відносна потужність і тривалість пуску приводного двигуна, що вимагаються від ВІСтГ, невеликі. В певних областях використання це може виявитись недостатнім, особливо при необхідності зниження струмів ВІСтГ, так як параметри, вплив яких досліджувався, недостатньо знижують фазні струми на початковій стадії пуску. Застосування прямих пусків ВІСтГ може бути небажаним особливо для потужних стартерів, які живляться від АБ низької ємності. Доцільно розробити принципи формування процесів в стартерних режимах ВІСтГ, які забезпечили б одночасно заданий час пуску, мінімальну енергію, спожиту від АБ при заданій величині фазних струмів в цих режимах.

Проведено дослідження пусків вентильно-індукторного стартер-генератора від акумуляторної батареї при обмеженні фазного струму. Обмеження здійснюється шляхом відключення фази при перевищенні фазним струмом  $i_\phi$  заданого значення  $i_{\phi(max)}$ \*. Тобто реалізується стабілізація максимального значення струму, що проходить через транзистори, на певному рівні, яке знаходиться межах гістерезису. Дослідження пусків проводились за однакового рівня обмеження фазного струму –  $i_{\phi(max)(ном)}=120$  А.

На рисунку 4 наведено осцилограми перехідних процесів при пуску ВІСтГ із обмеженням фазного струму. Незмінна величина фазних струмів дозволяє знизити пульсації електромагнітного моменту (рис. 4, а), що позитивно позначається на рівномірності розгону стартера (рис. 4, б) та забезпечує відсутність ударних моментів, оскільки середній електромагнітний момент практично незмінний на протязі всього пуску. Тривалість розгону стартера до частоти 1500 об/хв складає 3,74 с. При пуску ВІСтГ струм АБ (рис. 4, в) з деякого значення зростає пропорційно частоті обертання, відповідно напруга АБ (рис. 4, г) зменшується.

Середня потужність навантаження АБ складає 591 Вт, що в 8,7 раз менше, ніж у випадку прямого пуску. Загальні витрати енергії становлять  $W_{AB}=2266$  Дж, корисна енергія –  $W_{VICMГ}=2231$  Дж, втрати АБ –  $W_{em}=35$  Дж. За рахунок збільшення тривалості пуску загальна і корисна енергія АБ на 9,6 % і 30,6 % відповідно більше ніж у випадку пуску ВІСтГ без обмеження рівня фазного струму.

Досліджено вплив моменту інерції, ємності конденсатора, внутрішнього опору та ЕРС акумуляторної батареї, кутів комутації та рівня обмеження фазного струму на процеси в стартерному режимі ВІСтГ.

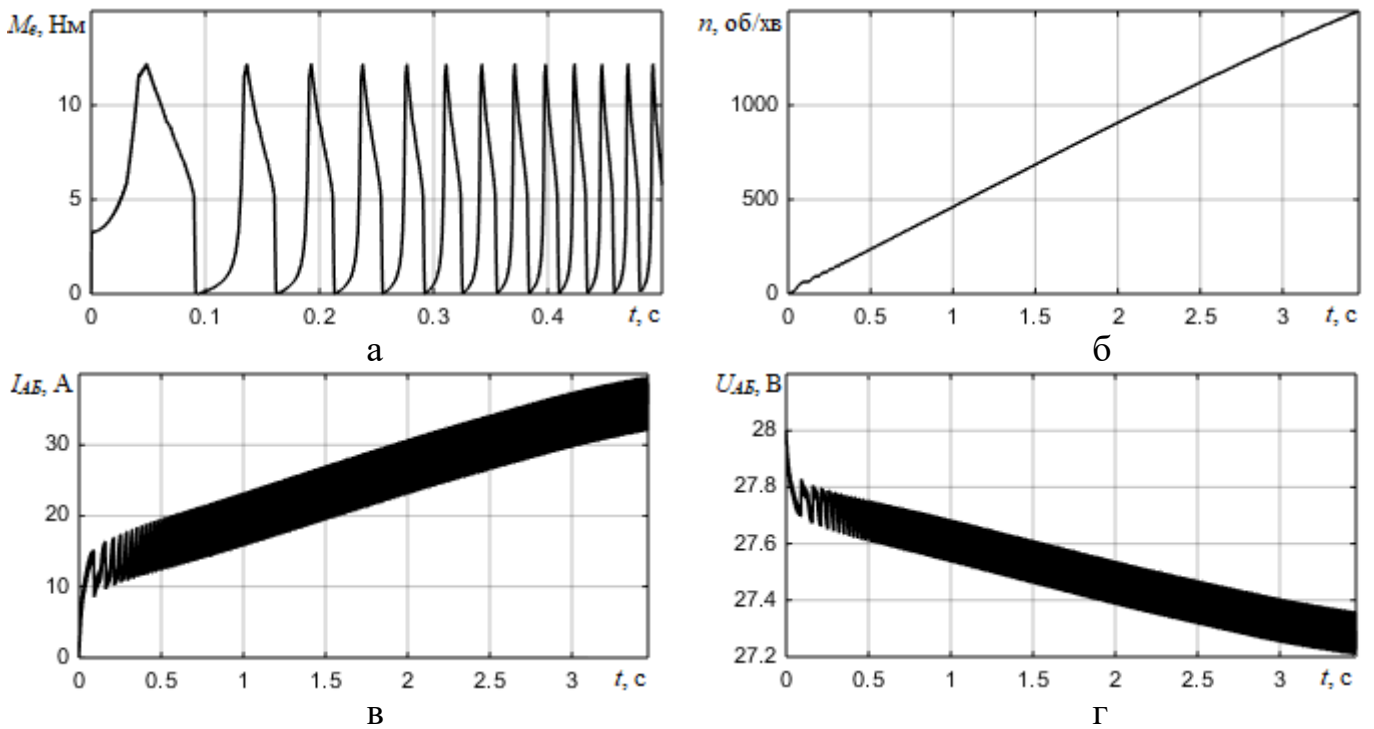


Рис. 4 Часові залежності електромагнітного моменту (а), частоти обертання (б), струму (в) та напруги АБ (г) в стартерному режимі ВІСтГ у випадку пуску із обмеженням фазного струму

Встановлено, що тривалість пуску ВІСтГ зменшується пропорційно зменшенню моменту інерції (на 3,74...3,77 с при зменшенні  $J_C$  на 0,1 кг·м<sup>2</sup>) та зростає за гіперболічною залежністю при зменшенні рівня обмеження фазного струму (в 70 разів при зменшенні  $i_{\phi(max)}$  від 600 до 60 А). Зменшення тривалості в певній мірі також можна досягти за рахунок вибору оптимальних значень кутів комутації, зокрема при їх збільшенні на 3...6° відносно номінальних час пуску зменшується на 4...6 %.

Зниження струму АБ можна досягти за рахунок зменшення моменту інерції, рівня обмеження фазного струму, зниження ЕРС акумуляторної батареї, зміни кутів комутації. Потужність навантаження АБ при цьому помітно знижується лише при зниженні рівня обмеження фазного струму.

Показано, що витрати енергії АБ під час пуску зменшуються пропорційно зменшенню моменту інерції (на 2266...2291 Дж при зменшенні  $J_C$  на 0,1 кг·м<sup>2</sup>). Зниження витрат енергії на 5...21 % та 5...7 % реалізується шляхом обмеження фазного струму на рівні  $(1,2...5)i_{\phi(max)(ном)}$  та збільшення кутів комутації на 3...9° ( $\theta_{вм}/\theta_{вим}=48^\circ/78^\circ...54^\circ/84^\circ$ ) відносно номінальних в порівнянні з пуском при номінальному рівні обмеження  $i_{\phi(max)(ном)}$ .

Таким чином, наведені рекомендації щодо формування процесів ВІСтГ в стартерному режимі за рахунок встановлення оптимальних значень параметрів дозволяють зменшити тривалість пускових процесів, витрати енергії АБ та знизити різкі стрибки фазних струмів та струму АБ.

**Четвертий** розділ присвячено розробці принципів стабілізації вихідної напруги вентильно-індукторного генератора (ВІГ) та чисельним дослідженням перехідних процесів генераторного режиму ВІСтГ.

Розроблено принципи регулювання вихідної напруги ВІСтГ в генераторному режимі: зміною кутів комутації (рис. 5, а) або рівня обмеження фазного струму (рис. 5, б) та структурні схеми систем керування, які реалізують запропоновані підходи.

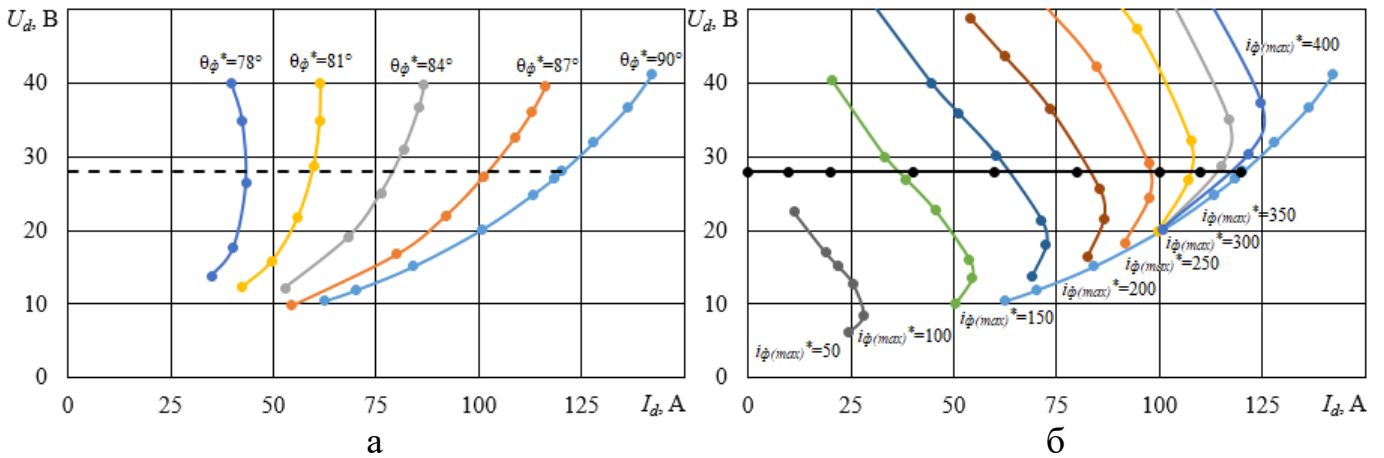


Рис. 5 Зовнішні характеристики ВІГ при зміні кутів комутації (а) та рівня фазного струму (б)

Недоліком першого підходу до стабілізації напруги являється зниження його ефективності при навантаженнях близьких до холостого ходу через збільшення крутизни зовнішніх характеристик ВІГ. При таких навантаженнях достатньо незначна зміна струму навантаження викликає значні відхилення рівня напруги, що вимагає застосування датчика кута повороту з дуже високою роздільною здатністю.

Запропоновано використовувати на практиці більш ефективний підхід до стабілізації вихідної напруги регулюванням максимального значення струму, що проходить через транзистори. В такому випадку стабілізація вихідної напруги ВІГ на заданому рівні забезпечується в діапазоні навантажень від 0 до 3,4 кВт. Підключення навантаження, що перевищує максимально допустиме, призведе до зниження напруги по природній зовнішній характеристиці генератора, а також до розмагнічування машини та розряду конденсатора кола постійного струму.

Проведено дослідження перехідних процесів збудження вентильно-індукторного стартер-генератора в генераторному режимі від АБ. Встановлено, що їх тривалість суттєво залежить від рівня обмеження фазного струму. Оскільки при обмеженні фазних струмів на рівні холостого ходу тривалість збудження перевищує 30 с, то доцільним є збільшення цього рівня до величини, яка відповідає максимальному навантаженню генератора. Так при  $i_{\phi(max)}=400$  А час збудження генератора складає 0,059 с (рис. 6).

Досліджено вплив внутрішнього опору АБ, ємності конденсатора, опору обмоток фази та кутів комутації на протікання процесів збудження ВІГ від АБ. Встановлено, що зменшення тривалості цих процесів при незмінному рівні обмеження фазного струму ( $i_{\phi(max)}=400$  А) досягається збільшенням ЕРС або зниженням опору АБ, однак це недоцільно з огляду на низьку енергоефективність таких підходів.

Визначено, що при збудженні ВІГ зниження витрат енергії АБ можна досягти зменшенням її ЕРС, збільшенням її опору або зменшенням ємності конденсатора.

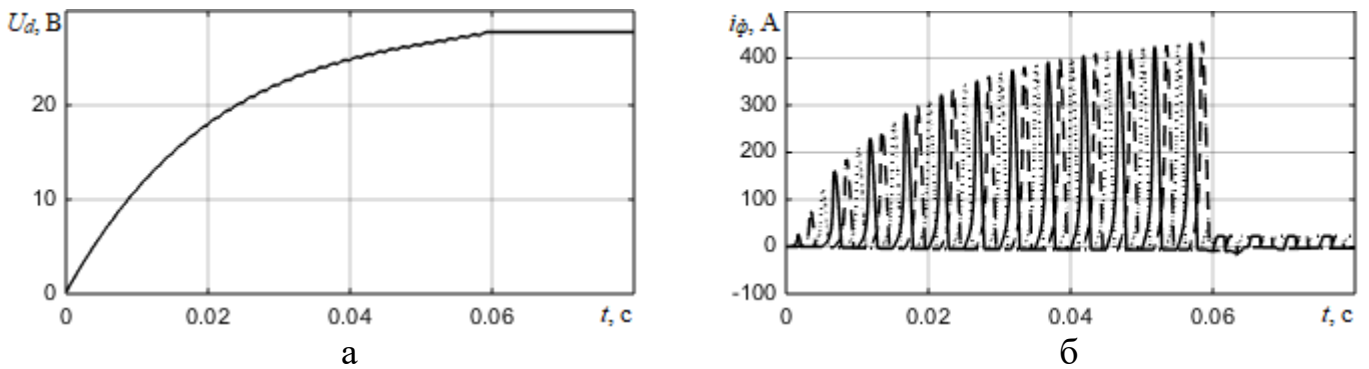


Рис. 6 Осцилограми перехідного процесу збудження ВІГ від АБ ( $E_{AB}=28$  В,  $R_{AB}=0,02$  Ом): вихідна напруга (а) та фазний струм генератора (б)

Проведено дослідження перехідних процесів накидання/скидання навантаження вентильно-індукторного стартер-генератора в генераторному режимі (рис. 7).

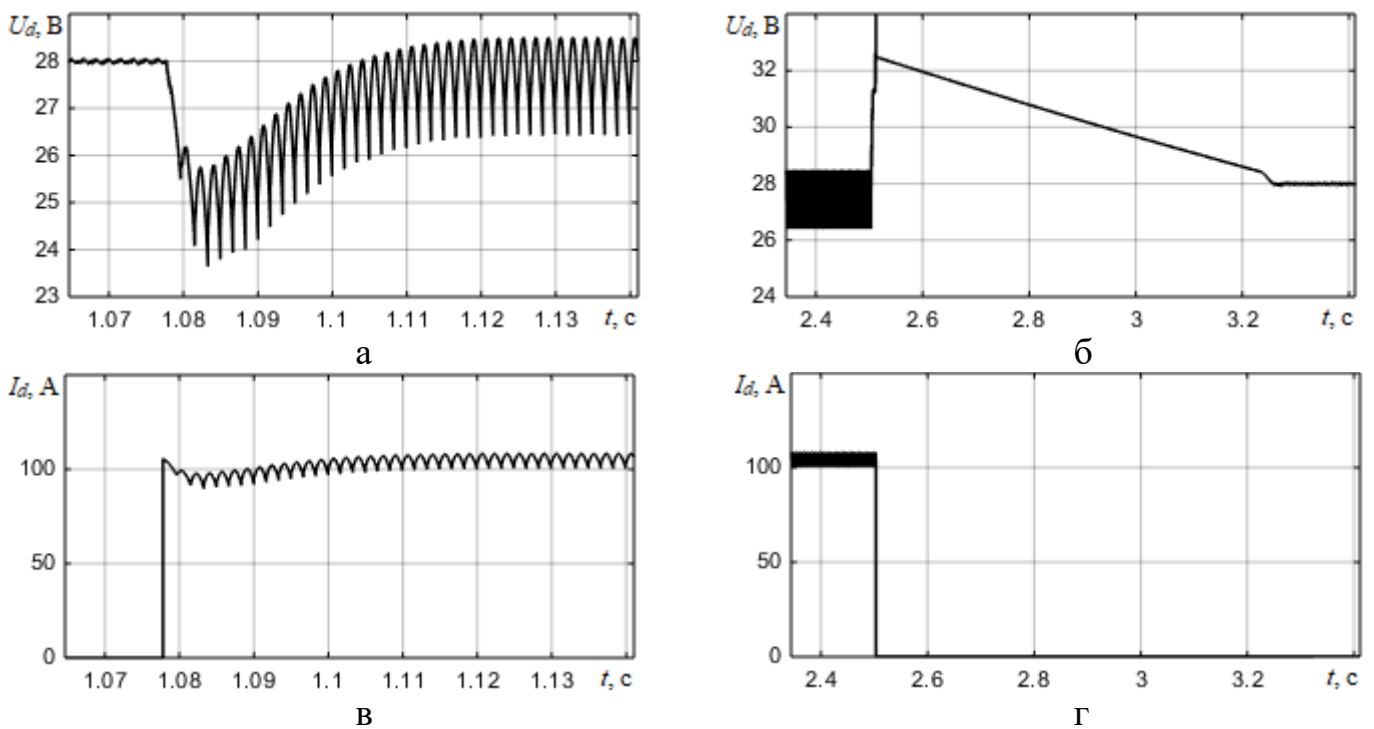


Рис. 7 Осцилограми перехідного процесу накидання (а, в) та скидання номінального навантаження (б, г) при ємності конденсатора  $C=0,1$  Ф: напруга (а, б) та струм (в, г)

В результаті досліджень перехідних процесів накидання та скидання навантаження встановлено, що якість генерованої напруги ВІГ залежить від ємності конденсатора: при її збільшенні зменшується перехідне відхилення напруги. Так для ємностей діапазону  $0,1 \dots 0,9$  Ф перехідне відхилення напруги при накиданні/скиданні номінального навантаження складає  $15,6 \dots 2/17,9 \dots 1,6$  %. Визначено, що за ємностей конденсаторної батареї  $0,2$  Ф та більше, якість електроенергії, яку виробляє ВІСтГ в режимі генератора, за показником перехідного відхилення відповідає вимогам стандарту.

Досліджено вплив ємності конденсатора кола постійного струму ВП на гармонічний склад вихідної напруги ВІГ. Встановлено, що збільшення ємності

призводить до зменшення коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги ВІГ, який, починаючи з ємності  $0,03 \text{ Ф}$ , менше за обмеження стандарту для електродвигунів постійного струму ( $k_{II(max)} \leq 8 \%$ ).

**П'ятий** розділ присвячений експериментальним дослідженням ВІСтГ.

Розроблено експериментальний зразок ВІСтГ потужністю 3 кВт і номінальною напругою 28 В (рис. 8) та проведено його експериментальні дослідження в стартерному та генераторному режимах. Представлено структурні схеми системи керування та наведено відповідні алгоритми.

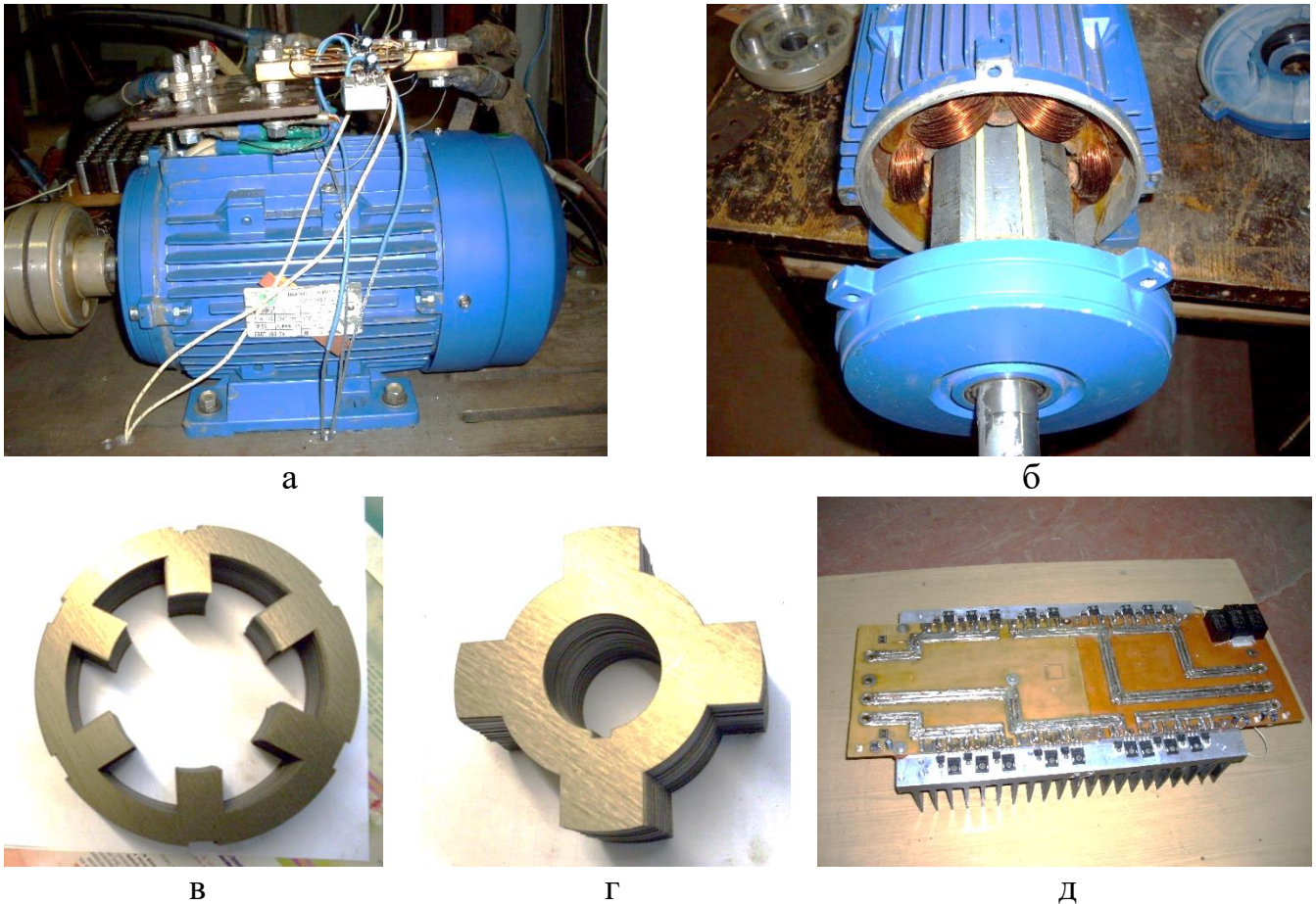


Рис. 8 Експериментальний зразок вентильно-індукторного стартер-генератора: загальний вигляд (а), статор і ротор (б), фрагменти статорного (в) та роторного пакетів (г), вентильний перетворювач (д)

Підтверджено, що в стартерному режимі застосування обмеження фазного струму дозволяє сформувати перехідний процес таким чином коли фазні струми безпечні для транзисторів напівпровідникового перетворювача. Крім цього можливе регулювання часу розгону стартера до заданої частоти обертання.

Підтверджена відповідність динамічних і статичних показників якості генерованої енергії ВІСтГ відповідним стандартам: перехідне відхилення при накиданні/скиданні номінального навантаження становить  $\delta U = 2,4/6,85 \%$ , час відновлення напруги  $0,2/0,15 \text{ с}$ , статичне відхилення напруги складає  $1 \dots 2 \%$ .

Проведено порівняльний аналіз результатів чисельних та експериментальних досліджень та встановлено адекватність математичного моделювання ВІСтГ.

Розрахункові осцилограми фазних струмів і напруг ВІСтГ якісно повторюють експериментальні, їх кількісні відхилення не перевищують 8 % (рис. 9).

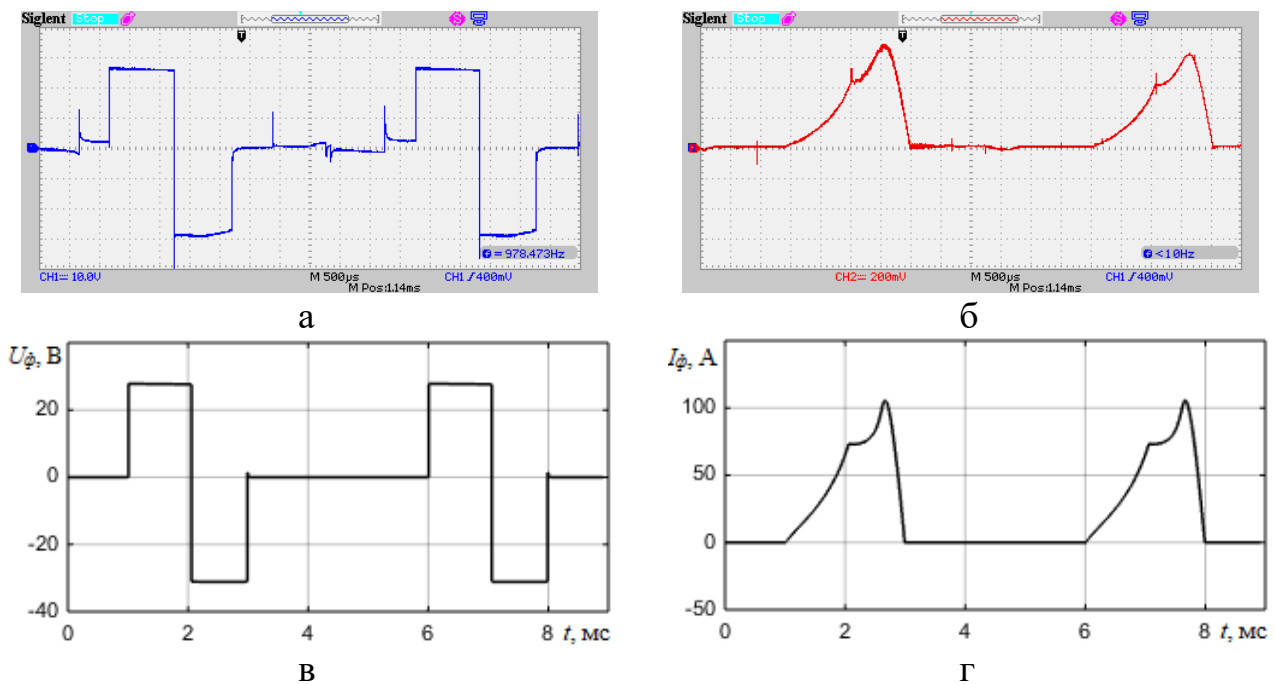


Рис. 9 Осцилограми фазних напруг (а, в) та струмів (б, г) ВІСтГ в генераторному режимі за навантаження  $0,187 P_{ном}$ : а, б – експеримент; в, г – розрахунок. Масштаб осцилограм струму  $100 \text{ мВ}=17,33 \text{ А}$

Результати досліджень експериментального зразка продемонстрували, що ефективність запропонованих підходів до формування пускових процесів та принцип стабілізації вихідної напруги регулюванням рівня обмеження фазного струму підтверджуються на практиці.

У **додатках** представлено імітаційну модель ВІСтГ, акти впровадження та використання результатів роботи, перелік публікацій здобувача.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе наукове завдання розроблення математичної моделі для аналізу режимів, визначення принципів формування характеру протікання перехідних і квазіусталених процесів вентиляно-індукторних стартер-генераторів з врахуванням параметрів електромеханічних перетворювачів, спрямованих на підвищення їх енергоефективності.

Основні наукові та практичні результати роботи наступні.

1. Проаналізовано системи запуску поршневого двигунів внутрішнього згорання та газотурбінних двигунів. Визначено тенденції розвитку пускових систем та систем електроживлення повітряних суден. Показано доцільність використання вентиляно-індукторних стартер-генераторів для систем запуску двигунів внутрішнього згорання і газотурбінних двигунів автономних енергоустановок та транспортних засобів.

Виконано аналіз наукових робіт, які присвячені дослідженню вентиляно-індукторних машин. З'ясовано, що питання стартерного та генераторного режиму ВІМ розглядалися недостатньо. Проаналізовано математичні моделі для дослідження процесів в вентиляно-індукторних машинах. Показано доцільність врахування

залежності індуктивності фази, розрахованої за польовими підходами, в рівняннях, що описують електричні кола, для одночасного забезпечення точності та швидкості розрахунків.

2. Вдосконалено математичну модель вентиляно-індукторної машини за рахунок використання запропонованих логічних виразів для визначення стану напівпровідникових елементів вентиляного перетворювача та рівнянь зв'язку між цим перетворювачем, індукторною машиною та елементами кола постійного струму, врахування втрат в сталі і механічних втрат. При цьому отримав подальший розвиток науковий підхід до врахування магнітних втрат електричних машин з використанням активного опору, струм якого визначається величиною потужності втрат та напругою ВІМ відповідно запропонованим логічним виразами. Розроблена модель дозволяє розраховувати перехідні та квазіусталені процеси ВІСтГ, реалізовувати різноманітні алгоритми керування як в стартерному, так і в генераторному режимах.

3. Вперше за допомогою запропонованої моделі визначено вплив параметрів вентиляно-індукторного стартер-генератора та акумуляторної батареї на енергетичні показники стартерного режиму, що забезпечує підвищення його енергоефективності шляхом формування перехідних і квазіусталених процесів.

Встановлено, що зменшення витрат енергії при пуску до 11 % можна досягти за рахунок вибору акумуляторної батареї з внутрішнім опором  $(1/2 \dots 1/8)R_{AB(ном)}$ , коефіцієнта широтно-імпульсного регулювання фазної напруги в межах  $0,7 \dots 0,9$  при пусках без обмеження фазного струму та до 21 % при його обмеженні на рівні  $(1,2 \dots 5,0)i_{\phi(max)(ном)}$  за номінальних параметрів.

4. Розроблено принципи стабілізації вихідної напруги ВІСтГ в генераторному режимі: зміною кутів комутації або рівня обмеження фазного струму. Запропоновано відповідні структурні схеми систем керування ВІСтГ в генераторному режимі та визначено, що найбільш ефективним є останній підхід.

Встановлено, що зменшення тривалості перехідних процесів збудження ВІСтГ в генераторному режимі від АБ від 30 до 0,059 с можна досягти за рахунок збільшення рівня обмеження фазного струму від 22 А до 400 А.

Визначено, що при збудженні ВІГ зменшення ЕРС акумуляторної батареї від  $1/2$  до  $1/4 E_{AB(ном)}$ , збільшення її опору в межах  $(2 \dots 8)R_{AB(ном)}$ , або зменшення ємності конденсатора в колі постійного струму від 0,4 до 0,01 Ф дозволяє знизити витрати енергії АБ відповідно в 4,3...19,2, в 1,1...1,6 та в 2,2...57,9 разів, відносно номінальних значень, і підвищити енергоефективність генераторного режиму.

За результатами дослідження гармонійного складу вихідної напруги ВІСтГ в генераторному режимі встановлено, що збільшення ємності конденсатора в колі постійного струму призводить до зниження вмісту гармонічних складових. За ємності 0,03 Ф і більше його значення менше за обмеження стандарту ( $k_{II(max)} \leq 8 \%$ ). При накиданні/скиданні номінального (половинного) навантаження перехідне відхилення вихідної напруги ВІГ за ємності конденсатора 0,2 Ф складає  $\delta U = 8,3/9,6 \%$  ( $\delta U = 4,3/5,8 \%$ ), а тривалість відновлення напруги –  $t = 0,11/0,7$  с ( $t = 0,02/0,52$  с), що відповідає вимогам стандарту ( $\delta U \leq 20 \%$ ,  $t \leq 2 \dots 3$  с для номінального та  $\delta U \leq 10 \%$ ,  $t \leq 1 \dots 2$  с половинного навантаження).

5. Розроблено та створено експериментальний зразок ВІСтГ потужністю 3 кВт і номінальною напругою 28 В. Підтверджено ефективність стабілізації вихідної напруги ВІСтГ регулюванням рівня обмеження фазного струму, що забезпечує стале

відхилення рівня вихідної напруги не більше 1...2 % від номінального її значення у всьому діапазоні навантажень.

Порівняння результатів чисельних та експериментальних досліджень вказують на адекватність математичного моделювання ВІСтГ. Відмінності розрахованих значень фазних струмів і напруг та ККД в генераторному режимі в діапазоні навантажень  $(0,17...1)P_{ном}$  від експериментальних даних не перевищують відповідно 7 %, 8 % та 1...13 %.

6. Результати роботи використовуються в навчальному процесі при викладанні дисциплін «Електричні машини», «Електротехніка та електромеханіка», «Машиновентильні системи технологічних комплексів» та виконанні дипломних бакалаврських і магістерських робіт в Національному технічному університеті України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського та Київському національному університеті будівництва і архітектури.

Подальше використання результатів роботи рекомендовано для систем запуску поршневих двигунів внутрішнього згоряння та газотурбінних двигунів автономних енергоустановок, допоміжних силових установок транспортних засобів, зокрема літаків та техніки спеціального призначення, що сприятиме підвищенню їх енергоефективності та ресурсозбереження.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О.А., Шихненко М.О. Моделювання режимів та регулювання частоти обертання вентильно-індукторного двигуна з перетворювачем із С–скиданням і коливальним поверненням енергії при зміні кутів комутації. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії» Х.: НТУ «ХПІ» – 2016 – № 2 (1194). С. 64–69.

2. Мазуренко Л.І., Шихненко М.О., Джура О.В., Білик О.А. Процеси збудження від акумуляторної батареї та вплив параметрів на робочі характеристики вентильно-індукторного генератора. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". С. 116–120.

3. Шихненко М.О., Мазуренко Л.І., Джура О.В., Білик О.А. Перехідні процеси та якість електроенергії автономного вентильно-індукторного генератора. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2019. – Вип. 1/2019 (45). С. 57–63.

4. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Formation of characteristics of operating modes of switched reluctance motors with periodic load. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, No.4, Pp. 12-16. (**Web of Science**)

5. Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В., Джура О.В., Бібік О.В., Гамалія Р.В., Шихненко М.О. Електромеханічні перетворювачі енергії для систем електрогенерації та електропривода. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, 2019. № 54. С. 63–74.

6. Мазуренко Л.І., Шихненко М.О., Джура О.В., Білик О.А. Дослідження стартерного режиму вентильно-індукторного стартер-генератора. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. Серія: *Електричні машини і електромеханічне перетворення енергії*, 2020. № 3 (1357). С. 97–100.

7. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Шихненко М.О., Білик О.А. Технічна реалізація та дослідження експериментального зразка вентильно-індукторного стартер-генератора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, 2020. № 55. С. 72–77.

8. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О.А., Шихненко М.О., Клименко В.Г. Спосіб стабілізації частоти обертання вала вентиляно-індукторного двигуна: пат на корисну модель № 107247 Україна, МПК H02P 6/08, завл. 07.12.2015; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.

9. Shykhnenko M.O., Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Bilyk O.A. Mathematical Model, Research and Improvement of the Switched Reluctance Generator Voltage Stabilization Methods. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” (Kharkiv), 2018. Pp. 338–342. (Scopus)

10. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Bilyk A.A., Shihnenko M.O., Switched Reluctance Generator Control System. *Automation–2017: XXIV International Conference on Automated Control*. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, September 13 – 15, 2017. Pp. 38-39.

11. Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Switched Reluctance Machines. *International scientific-practical conference of young scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2017»*, Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine, Kyiv, 28.11 – 01.12. – 2017. Pp. 249-250.

## АНОТАЦІЯ

**Шихненко М.О. Стартер-генератор підвищеної енергоефективності на основі вентиляно-індукторної машини.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 «Електричні машини і апарати». – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розробці математичних моделей, алгоритмів розрахунку, систем керування, аналізу перехідних і квазіусталених процесів та розробці принципів їх формування для підвищення енергоефективності стартер-генераторів на основі вентиляно-індукторних машин.

Доцільність використання вентиляно-індукторних машин в якості стартер-генераторів для систем запуску приводних двигунів ґрунтується на їх відомих перевагах: простота та надійність конструкції, вище значення ККД ніж у машин постійного струму або асинхронних машин тієї ж потужності.

Вдосконалено математичну модель вентиляно-індукторного стартер-генератора, що базується на диференційних і алгебраїчних рівняннях контурів статора, електромагнітного моменту, руху, залежностях індуктивності від кута повороту ротора та струму фази, в якій додатково використовуються розроблені логічні вирази для визначення стану напівпровідникових елементів вентиляного перетворювача та рівняння зв'язку між цим перетворювачем, індукторною машиною та елементами кола постійного струму та враховуються втрати в сталі і механічні втрати, що дало змогу розраховувати квазіусталені і перехідні процеси як в стартерному так і в генераторному режимах.

Розроблено імітаційні моделі ВІСтГ, які враховують нелінійність магнітної системи, дискретність роботи вентиляного перетворювача, механічні втрати, втрати в сталі та обмотках, особливість навантаження первинного двигуна та параметри акумуляторної батареї.

Вперше за допомогою запропонованої математичної моделі визначено вплив параметрів вентильно-індукторного стартер-генератора і акумуляторної батареї на енергетичні показники стартерного режиму. Розроблено рекомендації щодо принципів керування ВІСтГ в стартерному режимі, які забезпечують зменшення тривалості пускових процесів, витрат енергії АБ, фазних струмів та струмів АБ. Встановлено, що вибір акумуляторної батареї з внутрішнім опором  $(1/2 \dots 1/8)R_{AB(ном)}$ , коефіцієнта широтно-імпульсного регулювання фазної напруги в межах  $0,7 \dots 0,9$  та обмеження фазного струму на рівні  $(1,2 \dots 5)i_{\phi(max)(ном)}$  дає змогу підвищити енергоефективність стартерного режиму відповідно на  $1 \dots 5 \%$ ,  $3 \dots 11 \%$  та  $5 \dots 21 \%$ , відносно номінальних значень.

Науково обґрунтовано вплив величини ємності в колі постійного струму стартер-генератора на основі ВІМ в генераторному режимі на процеси збудження та накидання-скидання навантаження, що дозволило визначити мінімальне значення ємності, яка забезпечує відповідність стандартам коефіцієнта пульсації вихідної напруги і динамічних показників якості електроенергії. Розроблено рекомендації щодо керування ВІСтГ в генераторному режимі при збудженні і зміні навантаження, які забезпечили відхилення рівня вихідної напруги не більше  $1 \dots 2 \%$  від номінального її значення для всього діапазону навантажень та дозволили досягти зменшення тривалості перехідних процесів.

Розроблено дослідний експериментальний зразок ВІСтГ та проведено його експериментальні дослідження в стартерному та генераторному режимах. Отримані робочі характеристики ВІСтГ в генераторному режимі підтверджують ефективність запропонованих принципів регулювання його вихідної напруги зміною максимального значення фазного струму.

Викладені положення дозволили розвинути теорію вентильно-індукторних машин за рахунок розробки математичної моделі, уточнення характеру протікання електромеханічних процесів, визначення принципів формування перехідних і квазіусталених процесів з врахуванням параметрів і алгоритмів керування в режимах двигуна і генератора та підвищити енергоефективність вентильно-індукторних стартер-генераторів.

*Ключові слова:* електромеханічне перетворення енергії, вентильно-індукторна машина, система керування, стартер-генератор, математична модель, гармонічний склад, якість електроенергії, енергоефективність.

## ANNOTATION

***Shykhnenko M.O. Starter-generator of increased energy efficiency based on a switched reluctance machine.*** – Manuscript.

The thesis on receipt of scientific degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.09.01 «Electrical machines and apparatus». – Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation work is devoted to the development of mathematical models, calculation algorithms, control systems, analysis of transient and quasi-steady processes and the development of principles of their formation to increase the energy efficiency of starter-generators based on switched reluctance machines.

The feasibility of using switched reluctance machine as starter-generators to start the drive motor systems based on their known benefits: simplicity and reliability of design, higher efficiency than DC machines or asynchronous machines of the same power.

Improved mathematical model of switched reluctance starter-generator based on the differential and algebraic equations of stator circuits, electromagnetic torque, motion, dependencies of inductance on rotor angle and phase current, in which additionally uses developed logical expressions for determining the state of the semiconductor converter elements and the coupling equations between this converter, reluctance machine and DC circle, accounted steel and mechanical losses, which made it possible to calculate quasi-steady and transient processes, as in starter, as in generator mode.

Simulation models of switched reluctance starter-generator have been developed, which take into account the nonlinearity of the magnetic system, discrete operation of the semiconductor converter, mechanical losses, losses in steel and windings, the load of the primary motor and battery parameters.

For the first time, the influence of the parameters of the switched reluctance starter-generator and the battery on the energy indicators of the starter mode was determined with the help of proposed mathematical model. Recommendations for the principles of switched reluctance starter-generator control in the starter mode were developed, which provide the reduction of starting processes duration and the battery energy consumption, the phase and the battery currents reduce. It was found that the choice of a battery with internal resistance  $(1/2 \dots 1/8) R_{AB(nom)}$ , a coefficient of the phase voltage pulse-width regulation of in the range of  $0.7 \dots 0.9$  and the phase current limitation at the level of  $(1, 2 \dots 5) i_{ph(max)(nom)}$  allows to increase the starter mode energy efficiency by  $1 \dots 5 \%$ ,  $3 \dots 11 \%$  and  $5 \dots 21 \%$ , respectively, relative to the nominal values.

Scientifically found the impact of capacitance value in DC circle of switched reluctance starter-generator in the generator mode, on excitement and load change processes, that made it possible to determine the minimum value of the capacitance, which ensures the correspondence of coefficient of output voltage ripple factor and dynamic indicators of power quality with the standards. Developed recommendations on control switched reluctance starter-generator in generator mode in case of excitation and load changes, which provided the deviation of output voltage up to  $1 \dots 2 \%$  of the nominal value for the entire load range and allowed to reach the reduction of transient's duration.

An experimental sample of switched reluctance starter-generator was developed and its experimental studies in starter and generator modes were carried out. Obtained operating characteristics of switched reluctance starter-generator in generator mode confirm the effectiveness of proposed principles of its output voltage regulation by changing the phase current maximum value.

The explicated foundations allow to develop the theory of switched reluctance machines by developing a mathematical model, ascertainment the nature of electromechanical processes, determination the principles of transient and quasi-steady-state processes formation, taking into account the parameters and control algorithms in engine and generator modes and to improve the energy efficiency of switched reluctance starter-generators.

*Key words:* electromechanical energy conversion, switched reluctance machine, control system, starter-generator, mathematical model, harmonic composition, power quality, energy efficiency.