

ВІДГУК офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Мартінова Вячеслава Володимировича**
«Високовольтні напівпровідникові джерела живлення з синхронними несинфазними структурами для потужних газорозрядних установок»,
яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 - напівпровідникові перетворювачі електроенергії

1. Актуальність теми.

Для стабільного та енергоефективного електроживлення широкого класу потужних газорозрядних (зокрема електронно-променевих, іонно-плазмових та інших) установок, вольт-амперні характеристики яких можуть стохастично змінюватись у широких межах, необхідно розробляти джерела електроживлення, здатні формувати високу стабільну напругу з малим рівнем пульсацій та реалізовувати швидкі безколивальні перехідні процеси при імпульсному змінненні електричного опору навантаження. Складність вирішення такої науково-прикладної проблеми зростає при одночасному збільшенні потужності газорозрядних установок та вимог до стабільності вихідної напруги джерел електроживлення та стійкості їх вихідних параметрів до випадкового зміннення режимів навантаження у широких межах. Джерела електроживлення потужних газорозрядних установок повинні забезпечувати високу якість вихідної електроенергії та стабільність їх режимів при будь-яких імпульсних і широкодіапазонних змінненнях опору навантаження, навіть таких перехідних процесів, які не приводять до зміннення параметрів робочого режиму розряду в газовому проміжку.

Вказана особливість газорозрядних установок практично виключає можливість застосування в колах їх електроживлення індуктивно-ємнісних фільтрів та інших елементів, що накопичують значну електромагнітну енергію. Вирішення зазначеної проблеми найбільш ускладнюється саме при виникненні дуже швидких (імпульсних) змінень електричного опору навантаження перетворювачів, які обмежують застосування у вихідних колах джерел електроживлення значних індуктивних елементів, які після відключення джерела електроживлення можуть підтримувати виниклий дуговий розряд протягом тривалого часу. Це призводить до порушення технологічного режиму і суттєвого зменшення ресурсу електрообладнання.

У дисертації на основі синхронних несинфазних структур, які виконуються на основі асиметричних напівмостових інверторів з двообмотковим магнітозв'язаним дроселем, ввімкнутим у первинне коло підвищувального трансформатора, вирішено важливу науково-прикладну проблему розвитку теорії та принципів побудови високовольтних напівпровідникових джерел з синхронними несинфазними структурами для підвищення їх динамічних і енергетичних параметрів та стійкості до стохастичних збурень їх режимів при живленні потужних газорозрядних установок.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Актуальність та важливість дисертаційної роботи підтверджується її виконанням згідно планів НДР (№ ДР 0105U002316, 0109U05582, 0113U006534), які затверджені постановами Бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України і в яких здобувач був науковим керівництвом, та планів НДР Інституту електродинаміки НАН України (№№ ДР 01031U000355, 0101U003650, 0107U002097, 01071002368 0117U000291), в яких дисертант був відповідальним виконавцем окремих розділів. У цих НДР він розробив нові наукові принципи побудови високовольтних напівпровід-

никових джерел живлення з виконанням їх синхронних несинфазних структур на основі двотактних асиметричних напівмостових інверторів і нової стратегії багатоконтурного керування і стабілізації їх режимів з формуванням у навантаженні короткочасних пауз струму та умов його швидкого відновлення, що підвищує динамічні параметри і енергоефективність джерел живлення потужних газорозрядних установок.

3. Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності.

Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, двох додатків і списку використаних джерел із 223 найменувань. Загальний обсяг роботи складає 346 сторінок, у тому числі 310 сторінок основного тексту, 187 рисунків і 15 таблиць.

У вступі обґрунтовано актуальність виконання роботи, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну, практичне значення та реалізацію отриманих результатів дисертації, наведено дані про їх апробацію, впровадження та публікації.

Перший розділ присвячено аналізу тенденцій розвитку та особливостей побудови напівпровідникових джерел живлення потужних газорозрядних установок. Розглянуто основні проблеми та особливості впливу параметрів електроенергії високовольтних напівпровідникових джерел електроживлення на якість технологічних процесів газорозрядних установок та вплив процесів у навантаженні на вихідні параметри та режими таких джерел. Обґрунтовано потребу подальшого розвитку теорії та принципів побудови високовольтних напівпровідникових джерел з синхронними несинфазними структурами для підвищення їх динамічних і енергетичних параметрів та стійкості до стохастичних збурень їх режимів при живленні потужних газорозрядних установок.

Другий розділ присвячено аналізу впливу характеристик навантаження та умов перетворення параметрів електроенергії на енергоефективність і динамічні параметри потужних напівпровідникових джерел електроживлення газорозрядних установок та узагальнено особливості таких джерел. Встановлено, що енергія, яка накопичується у вихідних індуктивно-ємнісних фільтрах таких джерел, істотно залежить від їх потужності, частоти перетворення їх параметрів та затухання виникаючих в їх колах перехідних процесів. Чим меншим є коефіцієнт затухання в їх схемах, тим більшу енергію треба накопичувати у їх фільтруючих елементах для забезпечення необхідної якості вихідної напруги. У розділі визначено умови підвищення якості вихідної напруги багатофазних систем електроживлення та обґрунтовано доцільність розробки нових систем, в яких синхронні несинфазні силові структури виконано на основі двотактних асиметричних напівмостових інверторів, що не мають реактивних елементів у вихідних колах і використовують двообмоткові дроселі, в яких не змінюється напрям магнітного потоку при перемагнічуванні силового трансформатора.

У третьому розділі розроблено нові принципи побудови високовольтних напівпровідникових джерел електроживлення потужних газорозрядних установок шляхом розробки синхронних несинфазних структурах на основі двотактних асиметричних напівмостових інверторів з двообмотковими дроселями, що не мають реактивних елементів у вихідних колах джерел електроживлення. Зокрема запропоновано та обґрунтовано метод розрахунку якості вихідної напруги потужних багатофазних систем з двотактними асиметричними напівмостовими структурами, в основу якого покладено вирішення диференціальних рівнянь на інтервалі сталості структури при довільних початкових умовах, що описують багатофазну систему на $1/N$ частині періоду комутації. Це дозволяє визначати необхідну кількість фаз перетворювача для забезпечення заданої якості вихідної енергії перетворювача з урахуванням його фільтруючих влас-

тивостей. Визначено також параметри фазних струмів багатофазних систем з двотактними асиметричними напівмостовими інверторами і встановлено закономірності їх змінень у залежності від величини індуктивності розсіювання у колі навантаження.

У *четвертому розділі* отримано аналітичні залежності, що описують елементи розробленої однофазної еквівалентної моделі з виділенням в ній низькочастотних і високочастотних модульованих складових та проведено аналіз статичних і динамічних характеристик однофазної еквівалентної математичної моделі. Встановлено залежність модуляційної нелінійності від відносної частоти переривання та змінення коефіцієнту загасання передавальної функції імпульсного перетворювача.

П'ятий розділ присвячено розробці стратегії багатоконтурного керування стабілізованими напругою і струмом у потужній газорозрядній установці на основі лінійних і нелінійних зворотних зв'язків, контролю і запам'ятовування стану системи електроживлення та можливістю формування у навантаженні короткочасних пауз струму та умов його швидкого безколивального відновлення. Проведено аналіз отриманих передавальних функцій високовольтних багатофазних напівпровідникових систем електроживлення і встановлено зв'язок частотних властивостей перехідного процесу з еквівалентною схемою заміщення кола навантаження у системах електроживлення газорозрядних установках. Визначено умови захисту високовольтного дроселя від перевантажень та виникнення коливальних розрядів у контурі навантаження для безаварійної роботи елементів джерела електроживлення.

У *шостому розділі* наведено результати досліджень напівпровідникових перетворювачів з використанням розроблених математичних моделей та розроблено рекомендації щодо побудови та підвищення техніко-економічних та енергетичних показників напівпровідникових перетворювачів з високопотенціальними вузлами в джерелах живлення. Показано, яким чином з використанням розроблених рекомендацій створені джерела живлення потужних газорозрядних установок.

У *загальних висновках* дисертації автор представив найбільш важливіші наукові та практичні результати роботи і рекомендації щодо їх використання.

У *додатку А* наведено перелік публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію. У *додатку Б* наведено документи, що підтверджують впровадження та використання наукових і прикладних результатів роботи.

3. Основні результати досліджень та наукова новизна дисертації.

Основні наукові положення, висновки і рекомендації відповідають меті дисертації та поставленим задачам. Її наукова новизна полягає в розробці:

1. Нових принципів побудови високовольтних напівпровідникових джерел електроживлення на основі виконання їх синхронних несинфазних структур, як двотактних асиметричних напівмостових інверторів без реактивних елементів у колі навантаження, та введення двообмоткових дроселів, магнітний потік яких не змінює напрямку при перемагнічуванні силового трансформатора, що дає змогу підвищити динамічні характеристики та енергоефективність таких джерел і реалізувати в них примусові безколивальні паузи струму та його швидке відновлення.

2. Нової математичної моделі N-фазних джерел живлення на основі двотактних асиметричних напівмостових інверторів з широтно-імпульсною модуляцією та аналітичні вирази для розрахунку якості вихідної напруги та статичних і динамічних характеристик джерел шляхом вирішення диференціальних рівнянь на $1/N$ частині періоду

комутацій кожної структури (тобто на інтервалі її сталості) при довільних початкових умовах, що спрощує визначення кількості необхідних структур (фаз) таких джерел.

3. Методу визначення впливу потужності, частоти комутацій у кожній фазі та параметрів затухання індуктивно-ємнісних фільтрів високовольтних напівпровідникових джерел з двотактними асиметричними напівмостовими інверторами, що дає змогу визначити умови підвищення якості їх вихідної напруги.

4. Методу визначення статичних і динамічних характеристик напівпровідникових імпульсних стабілізаторів з широтно-імпульсною модуляцією на основі розрахунку параметрів однофазної еквівалентної математичної моделі, використанням методу їх усереднення в просторі станів і урахування модуляційної нелінійності (фактору пульсацій).

5. Стратегії багатоконтурного керування вихідними напругою і струмом джерел електроживлення з використанням лінійних і нелінійних зворотних зв'язків, контролю і запам'ятовування їх стану та реалізації безколивальних переривань і швидкого відновлення струму, що дає змогу суттєво підвищити динамічні режими потужних газорозрядних систем.

6. В результаті отримала розвиток теорія високовольтних напівпровідникових джерел живлення в напрямку реалізації в їх синхронних несинфазних структурах одноступеневого перетворення параметрів електроенергії, захисту комутуючих елементів від перенапруг і надструмів, відсутності реактивних елементів у колі навантаження та розробки стратегії стабілізації вихідних напруги і струму на основі його короткочасного переривання і швидкого відновлення, що підвищує динамічні характеристики та енергоефективність джерел живлення потужних газорозрядних установок.

4. Практичне значення результатів роботи полягає в розробці нових методик: визначення необхідної кількості двотактних асиметричних напівмостових структур – фаз напівпровідникових джерел живлення для досягнення заданої якості вихідної напруги з урахуванням особливостей навантаження і впливу потужності, частоти комутацій у кожній фазі та параметрів затухання індуктивно-ємнісних фільтрів; визначення статичних і динамічних характеристик багатofазних напівпровідникових імпульсних стабілізаторів з широтно-імпульсною модуляцією та розрахунку електромагнітних і теплових параметрів силових трансформаторів із урахуванням співвідношень геометричних розмірів їх магнітопровода.

Отримані наукові та практичні результати впроваджено при створенні експериментальних зразків високовольтних напівпровідникових джерел електроживлення в Інституті електродинаміки НАН України та потужних газорозрядних установок в Інституті електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України. Створене високовольтне напівпровідникове джерело живлення потужністю до 450 кВт впроваджено у газорозрядному устаткуванні підприємства МК "Антарес" (м. Київ) для промислового виготовлення високоякісних титанових виливків.

Рекомендації з визначення енергоефективних параметрів напівпровідникових вузлів джерел живлення потужністю 200-400 кВт впроваджено у промислових плазмових і електронно-променевих технологічних лініях підприємства "Електротехімпульс" (м. Київ).

Рекомендації з розрахунку електромагнітних процесів і енергоефективних параметрів напівпровідникових вузлів джерел резервного електроживлення впроваджено

на підприємстві СВП "Київські ТЕЦ" ПАТ "Київенерго". Зокрема було обґрунтовано, що напівпровідникові джерела, виконані на основі двотактних асиметричних напівмостових інверторів без реактивних елементів у колі навантаження і двообмоткових дроселів, магнітний потік яких не змінює напрямку при перемагнічуванні силового трансформатора, забезпечують підвищення швидкодії, зменшення запасу енергії у вихідних ланцюгах і зменшення пульсацій вихідної напруги.

Методики та науково-прикладні результати дисертації впроваджено також у навчальних дисциплінах "Електротехнологічні установки та системи" і "Силова перетворювальна техніка" кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

5. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій базується на комплексному підході до розрахунку та регулювання режимів живлення газорозрядних установок, використанні коректного застосування теорій електричних кіл, диференціальних рівнянь і автоматичного регулювання та підтверджується впровадженням розробок, опублікуванням, обговоренням та підтримкою результатів роботи на міжнародних науково-технічних конференціях.

6. Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях. За темою дисертації дисертант має 41 публікацію, зокрема 27 публікацій, що входять до переліку наукових фахових видань України, з них 5 публікацій у міжнародних наукометричних базах (МНМБ) Scopus і Web of Science та 16 публікацій у МНМБ Science Index (Elibrary), зроблено і опубліковано 11 доповідей у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій, отримано 7 патентів на винаходи.

7. Відповідність змісту автореферату та основних положень дисертації. Автореферат повною мірою відображає зміст та основні положення дисертації.

8. Використання в докторській дисертації результатів наукових досліджень захищеної кандидатської дисертації. У роботі не використовувались результати досліджень, які представлено в кандидатській дисертації.

9. Оформлення дисертації. Дисертація та автореферат написано українською мовою. Стиль викладення відповідає загальноприйнятному і має достатній науково-професійний рівень. Оформлення відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 (п.п.9, 10,12,13) та ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення».

10. Зауваження по дисертаційній роботі.

1. В пункті 1 наукової новизни висновок щодо зменшення постійної часу, тобто відношення індуктивності розсіювання вихідного кола фази джерела живлення і т.д.... слід визнати очікуваною закономірністю і не відносити до наукової новизни.

2. У роботі не достатньо відображено порівняльні характеристики високовольтних джерел електроживлення для газорозрядного устаткування, зокрема, відсутні відомості про принципи побудови та параметри джерел живлення у ВЕІ під керівництвом Г.М. Мустафи.

3. У четвертому пункті наукова новизна щодо «визначення впливу потужності та частоти комутації у кожній фазі та параметрів затухання індуктивно-ємнісних фільтрів» сформульована таким чином, що незрозуміло на що саме виникає вплив.

4. У роботі використовуються різні стилі при написанні формул та оформленні рисунків (зокрема мають місце похилі та прямі символи, розмірності на різних мовах та відсутність позначень).

Проте наявні зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи та отримані наукові і прикладні результати.

Висновок.

Дисертація Мартинова В.В. «Високовольтні напівпровідникові джерела живлення з синхронними несинфазними структурами для потужних газорозрядних установок» є завершеною та самостійною науково-дослідною роботою, в якій розв'язано актуальну науково-прикладну проблему розвитку теорії та принципів побудови високовольтних напівпровідникових джерел з синхронними несинфазними структурами для підвищення їх динамічних і енергетичних параметрів та стійкості до стохастичних збурень їх режимів при живленні потужних газорозрядних установок.

Дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р. та паспорту спеціальності 05.09.12 - напівпровідникові перетворювачі електроенергії, а її автор - **Мартинов Вячеслав Володимирович** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук.

Офіційний опонент, д.т.н., проф., декан факультету електроніки
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



В.Я. Жуйков

Пост. до СВР
15.09.2020
РА