

## **В І Д Г У К**

**офіційного опонента КОЦУРА Михайла Ігоревича**

**на дисертаційну роботу УДОВИКА Олександра Васильовича**

**«Електромагнітна сумісність промислових систем електропостачання в умовах обмеженої потужності енергосистеми», що подана на здобуття**

**наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю**

**141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

**Актуальність теми.** Проблема електромагнітної сумісності енергетичних об'єктів різних видів діяльності чи процесів розглядає умови «комфортного» існування кожного за відсутності неприпустимого впливу на інші суб'єкти. У системах електропостачання промислових підприємств технологічне електрообладнання, контрольно-вимірювальні прилади, первинні перетворювачі сигналів апарати комутації та захисту знаходяться у єдиній електромагнітній обстановці, причому будь-який із пристроїв є джерелом (генератором) електромагнітних завад (ЕМЗ). У загальному випадку електромагнітна завада характеризується як джерело струму або напруги, що впливає на основний сигнал (перша гармоніка промислової частоти) і небажано впливає (або може впливати) на нього. Основний сигнал – це корисний сигнал, який визначається принципом дії електроприймача, його системи управління та захисту. Система електропостачання підприємства є електромагнітним середовищем, в якому відбувається генерування, трансформація, передача та вплив електромагнітних завад на усі електроприймачі та основне обладнання електричних мереж. Тому виникає завдання їхньої електромагнітної сумісності, під якою розуміється здатність електрообладнання, апаратів і приладів нормально функціонувати в електромагнітному середовищі, не створюючи неприпустимих завад для іншого обладнання, що функціонує в тому ж середовищі. Ситуація стає більш складною та аварійною у випадках технологічних обмежень потужності короткого замикання енергосистеми, пов'язаних з

пошкодженнями генеруючих потужностей, магістральних ліній електропередач та системоутворюючих підстанцій в результаті наслідків військових дій.

У даній роботі запропоновано рішення забезпечення електромагнітної сумісності промислових систем електропостачання з несиметричними та нелінійними навантаженнями шляхом реалізації мінімальних впливів вищих гармонік та струмів зворотної послідовності та прогнозування резонансних явищ при децентралізованому живленні вузлів навантаження з відновлюваними джерелами енергії.

В зв'язку з цим вдосконалення методів та моделей дослідження показників електромагнітної сумісності у промислових системах електропостачання (СЕП) при різноманітних сценаріях технологічних обмежень енергосистеми з отриманням принципово нових залежностей у функції потужності короткого замикання на базових рівнях розподілу електроенергії є актуальною науковою задачею, вирішенню якої присвячена робота Удовика О.В.

У дисертаційній роботі поставлена наукова задача отримання закономірностей реалізації енергоефективних режимів роботи СЕП промислових підприємств з урахуванням режимних варіацій частотного складу вищих гармонік та інтергармонік, які відрізняються від існуючих можливостями врахування острівних режимів або режимів обмеження потужності енергосистеми.

*Перший розділ* дисертації присвячений аналізу стану проблематики даного напрямку дослідження, розкрито небезпечні та аварійні наслідки для системи електропостачання при порушенні електромагнітної сумісності. Дослідження та публікації в області електромагнітної сумісності (ЕМС) промислових систем електропостачання (СЕП) показали, що потребують уточнення залежностей для моделювання та прогнозування показників несиметрії, несинусоїдальності та коливання напруги. Для отримання достовірних результатів визначено основні завдання для дисертаційного

дослідження та рівень припущень, необхідний для подальшого впровадження результатів в умовах діючих підприємств.

У *другому розділі* досліджено різноманітні електромагнітні завади у промислових системах електропостачання, які мають несиметричні та нелінійні електричні навантаження. Визначною особливістю завад на металургійних та гірничих підприємствах є нестационарний характер зміни несинусоїдальності струмів та напруг при роботі дугових, феросплавних печей та перетворювачів частоти середньої та великої потужності. При цьому був прийнятий обґрунтований рівень припущень та початкових умов, який дозволив створити адекватні схеми заміщення систем електропостачання з урахуванням параметрів централізованої енергосистеми, характеристик вентильних перетворювачів та елементів електричних мереж.

Отримані вперше залежності дозволи стверджувати, що рівень потужності короткого замикання на шинах підстанцій промислових підприємств нелінійно впливає на показники якості напруги та залежить від особливостей графіків електричних навантажень гірничих та металургійних підприємств та наявності інтелектуальних пристроїв компенсації реактивної потужності та корекції рівнів вищих гармонік.

У *третьому розділі* проведено аналіз електричних режимів та енергетичної ефективності систем електропостачання промислових підприємств при роботі електротехнологічних установок з вентильними перетворювачами. Особлива увага приділялась частотному складу первинного струму перетворювачів частоти при централізованому живленні у післяаварійних та острівних режимах. При цьому порушення електромагнітної сумісності спостерігалось у вигляді резонансних явищ на шинах з джерелами розподіленої генерації. Математична модель прогнозування резонансних явищ дозволяє визначити значення резонансних частот при зміні конфігурації як схем внутрішнього електропостачання, так і зовнішніх електричних мереж. При цьому пристрої FACTS у вигляді пасивних фільтрів та STATCOM беруть участь у створенні резонансного

контуру та при певних співвідношеннях параметрів можуть впливати на порушення ЕМС.

Рівні вищих гармонік та інтергармонік при роботі випрямлячів та інверторів моделювались за допомогою стандартного математичного апарату на основі рядів Фур'є, що є ефективним інструментом дослідження періодичних функцій.

У четвертому розділі в середовищі Simulink / MATLAB були створені моделі промислових електричних мереж з інтелектуальними регуляторами FACTS. Для моделювання використовувалися реальні набори даних з навантаженням та генерацією електроенергії на промислових об'єктах, а також типові для металургійних та гірничих підприємств рівні вищих гармонік.

У спеціалізованому програмному забезпеченні виконано розрахунки показників енергетичної ефективності при роботі дугових сталеплавильних печей. Визначено діапазон розбіжності цих показників при моделюванні та експериментальних дослідженнях.

Сформульовано та представлено науково обґрунтований підхід до визначення показників якості напруги у розгалужених промислових системах електропостачання з використанням параметрів схем заміщення та їх особливостей при роботі у післяаварійних режимах.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Удовика О.В. є високою й базується на аналізі інформаційних джерел за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження, зіставленні і детальному критичному аналізу отриманих результатів з результатами інших дослідників, у якісному формулюванні отриманих висновків.**

Положення, висновки і рекомендації, наведені в дисертаційній роботі Удовика О.В., в достатній мірі обґрунтовані як з наукового, так і з технічного поглядів.

**Достовірність результатів досліджень** забезпечується коректністю методів математичного апарату, статистичного аналізу та законів розподілу. Дослідження виконані з використанням математичного апарату та сучасного комп'ютерного моделювання. Отримані результати перевірені використанням інформації від діючих гірничо-видобувних та металургійних підприємств України, що підтверджує достовірність сформульованих в дисертаційній роботі результатів дослідження, наукових положень, висновків і рекомендацій.

**Основні результати отримані Удовиком О.В. в дисертаційній роботі, які мають суттєву наукову новизну.**

1. Розвинуто механізми забезпечення нормативних рівнів якості електроенергії та електромагнітної сумісності систем електропостачання з урахуванням впливу канонічних вищих гармонік та інтергармонік, що відрізняються від існуючих можливостями прогнозування резонансних явищ, та ефекту обмеження потужності при децентралізації живлення.

2. Для умов системи електропостачання промислового підприємства отримано закономірності, що зв'язують параметри резонансних процесів у вузлі навантаження 6–10–35 кВ з кількістю, потужністю та режимами інтелектуальних пристроїв FACTS і відрізняються від існуючих можливістю прогнозувати ділянки амплітудно-частотних характеристик з резонансними явищами при приєднанні до вузлів навантаження сонячних електростанцій.

3. Вперше запропоновано метод прогнозування показників якості напруги при врахуванні режимних коливань потужності короткого замикання, що дозволяє оперативно коригувати уставки засобів захисту та інтелектуальних пристроїв корекції коефіцієнта потужності.

4. Розроблено нові математичні моделі комплексного впливу несинусоїдальності та несиметрії напруги на складові повної потужності трифазної електричної системи, відмінності яких полягають у можливості врахування широкого спектру вищих гармонік та інтергармонік, характерних для промислових підприємств та показників несиметрії напруги, що дозволяє

отримати уточнені значення додаткових втрат електроенергії та якісні баланси активних та реактивних навантажень.

Дисертація Удовика О.В. складається з анотації двома мовами, змісту, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 80 пунктів, додатків. Обсяг дисертації складає 188 сторінок.

Розроблені методики підтверджені актами впровадження на потужному промисловому підприємстві АТ «Нікопольський завод феросплавів», на сонячній електростанції «АЛЬФА ЕНЕРДЖІ ГРУП» та у навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

**Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Основні положення та результати дисертаційної роботи Удовика О.В. опубліковано у 11 наукових публікаціях, з яких 7 статей у наукових фахових виданнях України, взята участь у чотирьох міжнародних наукових конференціях та семінарах.

**Академічна доброчесність.**

Порушень академічної доброчесності в дисертаційній роботі та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків здобувача. Використання ідей, результатів та текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

**По дисертаційній роботі Удовика О.В. є зауваження:**

1. Які саме вихідні дані з діючих промислових підприємств приймалися для моделювання показників електромагнітної сумісності?

2. Потребує уточнення запропонований автором підхід до симетрування цехового навантаження за допомогою електротехнологічних

установок з вентильними перетворювачами. Яка фазність, потужність та частота живлення є припустимою з точки зору нагріву?

3. Чи потребує система електропостачання дугової сталеплавильної печі додаткових пристроїв корекції режиму при обмеженні потужності КЗ енергосистеми? Як це враховано у Ваших моделях визначення показників якості напруги?

4. З тексту дисертації не зрозуміло, як регресійні залежності (стор. 65-66) впливають на моделювання показників електромагнітної сумісності?

5. З тексту дисертації (стор. 77) не зрозуміло, як обирався діапазон зміни потужності КЗ на шинах живлячої підстанції при моделюванні параметрів силових резонансних фільтрів.

6. При моделюванні режимів STATCOM (рис. 4.8., стор. 130) для промислового навантаження за умов обмеженої потужності енергосистеми як врахована нестационарна природа зміни робочих струмів ДСП?

7. *Щодо загальної оцінки змісту, структури та оформлення результатів роботи. У роботі зустрічаються орфографічні, пунктуаційні та граматичні помилки, стилістичні неточності і описки (наприклад, на стор. 22 44, 135), але кількість їх допустима.*

Зазначені недоліки і зауваження не є принциповими і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Удовика О.В., її наукову новизну і практичну цінність.

## **ВИСНОВОК**

Дисертаційна робота Удовика Олександра Васильовича **«Електромагнітна сумісність промислових систем електропостачання в умовах обмеженої потужності енергосистеми»** є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково задачу та полягає у вдосконаленні моделей і методів визначення показників електромагнітної сумісності промислових систем електропостачання з урахуванням особливостей вищих гармонік та інтергармонік, які генеруються

вентильними перетворювачами електротехнологічних установок та сонячними інверторами, що дозволяє покращити якість напруги в «ослаблених» електричних мережах.

Дана дисертаційна робота за своїм змістом відповідає спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44, а здобувач Удовик Олександр Васильович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Офіційний опонент:**

доцент кафедри електричних  
та електронних апаратів

Національного університету «Запорізька політехніка»

кандидат технічних наук, доцент



Михайло КОЦУР

Підпис Михайла КОЦУРА засвідчую,

учений секретар

Національного університету «Запорізька політехніка»

кандидат соціологічних наук, доцент



Віктор КУЗЬМІН