

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Гапона Дмитра Анатолійовича на тему «Методи та засоби аналізу якості електропостачання та електромагнітної сумісності електротехнічних комплексів та систем», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

### **Актуальність теми дисертаційної роботи**

Проблема якості електропостачання електротехнічного обладнання існує як в Україні, так і за її межами, про що свідчить велика кількість публікацій як наукового так і загального характеру. Зокрема, існує, та регулярно оновлюється, низка міжнародних стандартів, таких як ІЕС 61000, EN 50160, ІЕЕЕ 519, ІЕЕЕ 1459, що визначають термінологію, методи вимірювання, характеристики обладнання, регламентують норми параметрів електричної енергії, класифікують порушення цих норм та таке інше. Загальною направленістю цих документів є вирішення проблеми електромагнітної сумісності обладнання у електричних мережах. Найбільш поширеними та відомими є такі події, як переривання та провали напруги живлення, перенапруги, гармонічні спотворення. Математичний апарат, що наведений у розглянутих нормах, дає можливість виявити факти порушень, але не дозволяє визначити відповідальність за ці порушення. Зважаючи на це, актуальним і важливим стає створення методів та алгоритмів, які б дозволяли визначити джерело та кількісні оцінки окремих спотворень. Це є необхідним кроком для побудови ефективної системи економічного стимулювання забезпечення високої якості електропостачання електротехнічних комплексів та систем.

Мета дисертаційної роботи Гапона Д.А. полягає у вирішенні науково - прикладної проблеми розвитку методів і засобів, що дозволяють отримати характеристики режимів електропостачання та енергоспоживання для окремих

споживачів, електротехнічних комплексів та систем, а також оцінити ступінь відповідальності, як споживача, так і енергопостачальної організації, в разі виявлення порушень норм якості електропостачання. Це дозволяє реалізувати економічні важелі впливу у вигляді підвищених виплат та штрафів для порушників.

Сьогоднішні інформаційні системи вимірювання аналізу якості та обліку електроенергії, розробки комп'ютерних програм та апаратного забезпечення допомагають створенню необхідних методів та засобів щодо побудови ефективної системи норм та засобів стимулювання підвищення якості електропостачання. Ці можливості у достатньо повній мірі використано та висвітлено здобувачем у представленій дисертаційній роботі, авторефераті, держбюджетних науково-дослідних роботах, де він був виконавцем окремих розділів, його статтях у вітчизняних та зарубіжних наукових журналах та монографіях.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій**

Представлені наукові положення, висновки і рекомендації, їх достовірність і наукова новизна у дисертаційній роботі є обґрунтованими, логічно завершеними, оскільки базуються на використанні фактичної інформації параметрів електроспоживання, отриманих в реальних системах електропостачання промислових та інших об'єктів, зокрема тягових підстанціях залізниці, застосуванні методів комп'ютерного моделювання, математичного аналізу, спектрального аналізу, числових методів рішень трансцендентних рівнянь та систем рівнянь.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур математичного аналізу й методів теорії електричних кіл, відповідністю змісту математичних конструкцій фізичній суті описуваних процесів. Наукові

результати здобувача успішно використані під час вирішення окремих проблем електромагнітної сумісності електротехнічного обладнання у електричних мережах України.

Висновки дисертації є достатньо повними, логічними та відображають її сутність.

**Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:**

- запропоновано нові концепцію та математичний апарат розрахунку «середньореактивного» споживача, що, на відміну від існуючих, дозволяють отримати порівняльну оцінку енергоефективності у вигляді коефіцієнту втрат у однофазних та трифазних мережах при довільних формах напруг та струмів;

- вперше запропоновано математичні засади поєднання окремих складових енергетичної ефективності, які визначаються несиметрією, нелінійністю, реактивністю та нестаціонарністю навантаження і, на відміну від існуючих, дозволяють визначати проблемні фактори та шляхи підвищення якості електроспоживання;

- вперше запропоновано математичні засади оцінки впливу несиметрії навантаження на енергетичну ефективність режиму енергоспоживання у вигляді коефіцієнту втрат від несиметрії, що дозволяє отримати кількісну оцінку впливу несиметрії на якість електроспоживання у трифазних мережах при довільних формах напруг та струмів;

- вперше запропоновано критерій оцінки впливу нестаціонарності споживача на неоптимальність режиму енергоспоживання що дозволяє отримати кількісну оцінку впливу нестаціонарності навантаження на якість електроспоживання у однофазних та трифазних мережах при довільних формах напруг та струмів;

- вперше запропоновані принципи обліку електричної енергії з врахуванням енергетичної ефективності режиму електроспоживання, що дозволяє економічним шляхом стимулювати підвищення якості електропостачання;

- вперше запропоновані принципи обліку електричної енергії з урахуванням можливих порушень норм електромагнітної сумісності, який, на відміну від

існуючих, дозволяє реалізувати ефективні економічні важелі для забезпечення високої якості електричної енергії як з боку споживача, так і з боку електропостачальника.

**Практична цінність отриманих результатів дисертаційної роботи** Гапона Д.А. полягає у розробці нових засобів оцінювання якості електропостачання, визначення кількісної оцінки енергетичної ефективності режиму електроспоживання, визначення джерел спотворень та оцінювання вагового внеску окремих видів спотворень у загальну оцінку. Запропоновано реалізацію пристрою обліку із застосуванням сучасної елементної бази та розроблених методів. Основні положення, рекомендації та висновки дисертації оприлюднені у наукових журналах, втілюються у навчальний процес кафедрою «Автоматизація та кібербезпека енергосистем», іншими кафедрами Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» під час лекцій, лабораторних та практичних занять зі спеціальних дисциплін, використовуються у кваліфікаційних роботах бакалаврів, науково-дослідних магістерських, аспірантських роботах.

Результати роботи впроваджені в ТОВ «ТЕССА» (м. Харків) і ТОВ «Енергосервісне підприємство «Преобразователь»» (м.Суми), при проведенні обстеження електроприймачів промислових підприємств, у ПАТ «Укргідропроєкт» під час роботи над проектом ГЕС, а також, окремі матеріали використані ТОВ «КиївПромЕлектроПроект» при розробці ДСТУ-Н Б В.2.80-2016.

**Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.**

За темою дисертації опубліковано 40 наукових праць, з яких: 4-у журналах, які індексуються у наукометричній базі Web of Science, 25 -у наукових журналах, що внесені до переліку наукових фахових видань України, 2-х монографіях, а також у 10 доповідях на Міжнародних форумах та науково-практичних конференціях, семінарах, в яких достатньо повно викладені наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи.

В авторефераті достатньо повно відображаються сутність дисертаційної роботи, основні результати досліджень, висновки та рекомендації.

### **Аналіз змісту дисертації.**

У першому розділі дисертаційної роботи Гапона Д.А. викладено результати аналізу існуючих методів визначення джерела та відповідальності окремих споживачів за погіршення якості електропостачання. Як показав аналітичний огляд, існує декілька підходів, які базуються на використанні статистичних методів, використанні пробних відключень та генераторів штучних завад, теорій потужності та аналітичних методів. Для визначення

У другому розділі наведено результати дослідження схеми електропостачання, на основі яких зроблені висновки та отримані деякі характеристики системи електропостачання трифазного електротехнічного об'єкту з напругою живлення 10 кВ. Дослідження проведено із застосуванням комп'ютерної моделі. Показаний вплив споживачів, що підключені до системи шин підстанції на показники якості напруги у загальній точці приєднання та проаналізовано вплив параметрів системи електропостачання ці показники. Доведено, що визначення джерела вищих гармонік традиційними методами - за напрямками складових потужностей вищих гармонік не дозволяє впевнено знаходити відповідального за спотворення коли нелінійних споживачів декілька. Проведений аналіз сумісності стандартів EN 50160 та IEEE 519 згідно норми рівнів гармонійних складових у складі струму та напруги. У окремих випадках вищі гармоніки струму, що генерує споживач, який не порушує межі стандарту IEEE 519, можуть викликати появу гармонік напруги, що перевищують межі установлені у EN 50160. Зроблено припущення щодо можливості обмежень генерації вищих гармонійних складових встановленням нормованих значень опору системи.

У третьому розділі запропоновано подальший розвиток математичного апарату визначення коефіцієнту втрат та коефіцієнту потужності, як інтегральних оцінок якості електропостачання. Обґрунтовані визначення

інтегральних коефіцієнтів втрат у трифазних трипровідних та чотирьохпровідних мережах.

Отримала подальший розвиток теорія споживача який є еталоном режиму електроспоживання. Математично доказано, що в трифазній трипровідній мережі еталонний споживач при несиметричній та несинусоїдальній напрузі представляє з себе симетричний трикутник постійних активних опорів. У трифазній чотирьохпровідній системі еталонним споживачем є поєднання симетричного трикутника постійних активних опорів і симетричної зірки незалежно від ступеню несиметричності та несинусоїдальності системи напруг.

Запропоновано метод виділення окремих складових що відповідають за несиметрію, нелінійність, реактивністю та нестационарністю із загальних коефіцієнтів втрат.

Запропоновано «еталон» реактивного споживача з умов відповідності перетоків потужності до і від споживача у електричну мережу, який дозволяє реалізувати обчислення коефіцієнту реактивності та потужності при несинусоїдальній та несиметричній напрузі у трифазних мережах. Показано, що такий еталонний реактивний споживач тяжіє до генерації вищих гармонік. Крім того відсутній апарат аналітичного або чисельного пошуку рішення екстремуму. Запропоновано визначення струму середньореактивного споживача, як такого, у якого усі гармоніки мають рівний фазовий зсув та співвідношення обсягів енергії що перетікають до і від споживача. Це дозволило значно спростити обчислення струму та реалізувати порівняння режиму електроспоживання поточного споживача з таким середньореактивним.

Запропоновано методи визначення коефіцієнтів втрат і потужності від несиметрії для трифазного споживача при несиметричній та несинусоїдальній напрузі. Запропоновано метод розподілення коефіцієнтів втрат від реактивності і нелінійності споживача за напрямками активних складових окремих гармонік. Запропоновано розрахунок коефіцієнту втрат від нестационарності споживання.

У четвертому розділі за допомогою комп'ютерної моделі зроблено аналіз характеру залежності комплексного опору електричної мережі від її складу та

характеристик елементів на напрузі 10 КВ. За отриманою залежністю запропоноване застосування нормованих значень опору як оцінки пропускної здатності мережі.

Набув подальшого розвитку метод вимірювання електричних параметрів трифазної мережі заснований на апроксимації вхідного сигналу сумою гармонійних складових. Метод має автоматичне підстроювання інтервалу спостереження при зміні частоти мережі у робочому діапазоні. Також при визначенні інтервалу використовується повний набір напруг фаз з урахуванням їх вагових значень, що дозволяє забезпечити високу точність вимірювання як при наявності несиметрії, вищих гармонік, аперіодичної складової так і за умови відсутності напруги у окремій фазі. Перевагою методу також є використання вхідних даних з постійною частотою квантування, що дозволяє спростити апаратну частину приладу обліку. Обчислення середньоквадратичних значень виконується з точною прив'язкою до періоду напруги, що дозволяє виключити частотну похибку.

Запропоновано методику обліку електричної енергії з використанням коефіцієнту втрат та показників якості електричної енергії. Її особливістю є додатковий облік обсягу енергії втрат у процесі передачі електричної енергії. Такий метод обліку направлений на тарифікування всіх видів відхилень у режимах роботи навантаження, таких як реактивність, нелінійність і нестационарність. Запропонована система штрафних санкцій у разі невідповідної якості електропостачання.

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень, дані яких підтверджують теоретичні положення, розроблені у розділах 3 та 4. Реалізовані оцінки якості електроспоживання визначеннями коефіцієнтів втрат та їх окремих складових.

Експеримент демонструє ефективність запропонованих методів виділення окремих складових. Проаналізовано запропоновану у розділі 3 методику порівняння з еталонним реактивним та середньореактивним споживачем, що не виявили себе в якості ефективних інструментів аналізу.

Експериментально підтверджено ефективність визначення джерела струмів вищих гармонік за напрямками складових потужності струму спотворення. Також проведені випробування за допомогою осцилограм, отриманих на реальних тягових підстанціях, як характерних об'єктів з високим рівнем проблем електромагнітної сумісності. Випробування також підтвердило працездатність та ефективність розроблених методів. Використання математичного апарату розробленого в розділі 4 дозволяє виявити джерело спотворень, навіть за умови коли одночасно декілька споживачів виступають в якості джерел цих спотворень

У висновках наведено основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

Наукові результати кандидатської дисертації Гапона Д.А. не винесені на захист докторської дисертації.

Отримані в дисертації результати, а саме методи обліку електричної енергії з урахуванням впливу режиму на якість електропостачання, порушень допустимих значень з точки зору електромагнітної сумісності, методи визначення окремих складових у вигляді коефіцієнтів втрат, метод вимірювання параметрів електричної мережі з автоматичним налаштуванням тривалості інтервалу спостереження можуть бути використані при побудові нормативної бази та метрологічного забезпечення систем контролю та обліку електричної енергії енергогенерувальними та енергопостачальними компаніями, експлуатаційними організаціями для проектування й аналізу режимів і процесів у системах електропостачання промислових та цивільних об'єктів.

### **Зауваження**

1. У розділі 1 дисертації більшість методів визначення фактичного вкладу споживача у погіршення показників якості електричної енергії та теорії потужності розглянуті поверхнево, слід було б зупинитися на деяких з них більш детально.

2. У розділах 2, 4 та 5 у якості нелінійного навантаження в комп'ютерному моделюванні розглядається лише схема Ларіонова, в той час як існує велика кількість електротехнічного обладнання з нелінійними характеристиками.

Доцільно було б розглянути і інші види нелінійних навантажень.

3. Запропонований у підрозділі 3.9 метод розрахунку коефіцієнту втрат від несиметрії не має достатнього обґрунтування та не розглянуто, як він співвідноситься із традиційними коефіцієнтами несиметрії.

4. У підрозділі 3.11, вказано, що при розрахунку коефіцієнту втрат від нестационарності «довгий» інтервал обирається у діапазоні 3с-1хв, але така велика розбіжність (у 20 разів) здатна значно впливати на результати розрахунку. Крім того, повністю відсутнє обґрунтування вибору тривалості як «довгого» так і «короткого» інтервалів.

5. На рис. 3.10 (стор. 126) відсутні позначення осей. Відсутні вони й на деяких інших рисунках (рис. 3.11...).

6. На рис. 4.3, 4.5 та інших замість «Залежність спротиву від гармоніки» та «Модуль спротиву» слід було написати «Залежність опору...» та «Модуль опору».

7. Отримана емпірична залежність опору від потужності (4.1) є занадто грубою та потребує більш вагомого обґрунтування ніж результати комп'ютерного моделювання.

9. Викладені автором положення наукової новизни отриманих результатів не в повній мірі відображають зроблене автором і не в усьому відповідають вимогам Міністерства Освіти щодо визначення рівня новизни, її суті, відмінності та позитивного ефекту. У п.1, 2, 3 відсутні відмінні особливості метода. Крім того, п.8, п.9 наукової новизни в представленому вигляді не є переконливими, оскільки методи вимірювання електричних параметрів режимів та обліку електричної енергії є відомими, а наведені автором відмінності не розкривають суті зробленого.

10. У списку використаних джерел є помилки та некоректно оформлені посилання. Так у п.65, 66, 160 не вказано тип джерела.

11. В роботі має місце низка неточностей або невизначеностей, а саме:

- назва підрозділу 5.5 «Модель електроспоживання з перевищенням допустимих меж» не коректна та не відображає сутності змісту;

12. В роботі мають місце не коректні або не виважені формулювання та твердження («апарат симетричних складових, який є незручним у випадку...», «співвідношення позитивної та негативної часток енергії...», «навіть спроба рахувати квадрат миттєвої потужності », тощо)

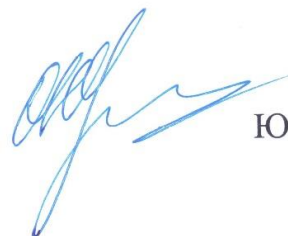
Зазначенні зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву результати проведених досліджень, та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи здобувача Гапона Д.А.

### **Висновки**

В цілому дисертаційна робота Гапона Д.А. є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обгрунтовані результати, що вирішують актуальну науково-прикладну проблему - створення методів і засобів аналізу якості електропостачання та електромагнітної сумісності електротехнічних комплексів та систем. За своїм змістом дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

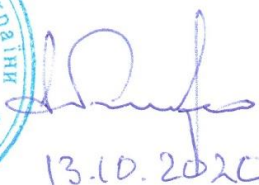
Дисертаційна робота за актуальністю теми, обгрунтованістю та достовірністю наукових положень, новизною досліджень і практичною цінністю отриманих результатів відповідає вимогам п. п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (із змінами), а її автор, Гапон Дмитро Анатолійович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 — електротехнічні комплекси та системи.

Доктор технічних наук, професор,  
завідувач відділу транзисторних  
перетворювачів Інституту  
електродинаміки Національної  
академії наук України



Юрченко О.М.

Підпис О. М. Юрченка засвідчую.  
Вчений секретар ІЕД НАН України, к.т.н.



13.10.2020

Кофто О. Г.