

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

**доктора технічних наук, доцента**

**Козлова Олексія Валерійовича на дисертаційну роботу**

**ПЕТИК ТАЇ ВОЛОДИМИРІВНИ**

«Удосконалення АСУ ТП за рахунок пошуку меж використання математичних моделей урахування внутрішніх збурень ЯЕУ», яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування», із зазначенням наукового рівня дисертації і наукових публікацій

### **Актуальність обраної теми.**

Дисертаційна робота присвячена питанням розробки умов безпечної експлуатації ядерної енергетичної установки з ВВЕР-1000 та забезпечення її керованості, а також сталості виробництва енергії під час перехідних процесів у реакторі. Основна увага приділяється вдосконаленню автоматизованої системи управління потужністю, яка враховує межі застосування математичних моделей, що визначають внутрішні збурення активної зони реактора. Це є критично важливим для підвищення безпеки та ефективності роботи ядерних енергетичних установок. В рамках дослідження було проведено комплексний аналіз і синтез різнотипних математичних моделей для їх використання у моделюванні автоматизованих систем управління зміною потужності на атомних електростанціях з ВВЕР-1000. Результатом наведеного аналізу стало визначення меж ефективного застосування фізико-математичних та апроксимаційних моделей, що враховують внутрішні збурення активної зони реактора. Отримані результати є важливим внеском у розвиток сучасних систем управління ядерною енергетикою та можуть бути використані для подальших досліджень та розробок з метою підвищення ефективності, надійності та безпеки експлуатації ядерних енергетичних установок в умовах сучасних викликів енергетичного комплексу. Тому, тема дисертаційних досліджень, спрямованих на розвиток методів, моделей та удосконалення автоматизованої системи управління ЯЕУ для підвищення ефективності її функціонування у динамічних режимах, безумовно є актуальною.

### **Новизна представлених теоретичних та експериментальних результатів дослідження.**

Окремі положення, що сформульовано у вигляді наукової новизни, разом вирішують нове наукове завдання, важливе для галузі знань, з якої представлена дисертаційна робота захищається, а саме: «Автоматизація та приладобудування», галузь знань – 15, за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Можна погодитися, що дана робота містить раніше незахищені наукові положення та отримані автором нові науково обґрунтовані результати. А саме:

– отримано подальший розвиток тривимірної математичної моделі активної зони ядерного реактора типу ВВЕР, яка на відміну від існуючих, реалізувала можливість розрахунку вектору керуючого впливу на основі характеристик гомогенного і гетерогенного поглиначів нейтронів, що дало змогу автоматизованого управління в реальному часі при компенсації зовнішніх збурень

для підтримки сталості регулюючого параметру у вигляді електричної потужності та кількісної міри сталості реактора у вигляді аксіального офсету як міри безпеки експлуатації;

– отримав подальший розвиток метод автоматизованого управління плановою зміною потужності ЯЕУ з ВВЕР–1000, на базі математичної моделі реактивності активної зони, за допомогою якої можна розраховувати стани керування, коли немає необхідності пригнічувати збурення викликані зміною концентрації ксенону для зменшення зміни концентрації борної кислоти, і тим самим підтримувати кількісну міру стабільності реактора, який складається з трьох контурів керування, один з яких підтримує зміну потужності реактора за рахунок регулювання концентрації БК в теплоносії, другий підтримує необхідне значення аксіального офсету шляхом зміни положення стрижнів СУЗ, а третій температурний режим теплоносія за рахунок регулювання положення головних клапанів ТГ, який відрізняється від відомих тим, що для забезпечення стабільності енерговиділення в АКЗ при зміні її потужності за нормальних умов експлуатації реактора процес керування потужності: по-перше реалізується на малому проміжку часу як зміна завдання керування потужності при стабільній поточній потужності (принцип керування по відхиленню) і по друге використання внутрішньо притаманної властивості активної зони (отруєння-розотруєння реактора) при зміні потужності, що дозволило підтримувати сталість балансу виробництва та споживання енергії в ядерній установці;

– вдосконалено комп'ютерну систему автоматизації АЕС з ВВЕР при зміні навантаження ядерного реактора для забезпечення стабільного і контрольованого енерговиділення по об'єму активної зони реактора за прийнятих технологічних параметрів для підтримки сталості балансу в енергетичних контурах АЕС з ВВЕР за рахунок того, що в імітаційну структурну модель додатково інтегрується уявлення межі використання апроксимаційної або фізико-математичної моделей, які в залежності від умов сталості розв'язують задачу керування, що дає можливість мінімізувати поточні зовнішні та внутрішні збурення.

Додатково потрібно зазначити, що пункти наукової новизни теоретичних та експериментальних результатів дослідження опубліковано в наукових періодичних виданнях:

– Петік, Т. В. & Лисюк, Г. П. «Автоматична система регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку 1000МВт атомної електричної станції». Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019; 30 (69) Ч. 2 № 3: 7–13. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/02>.

– Петік, Т. В. & Давидов, В. О. «Розробка моделі процесу зміни рівня води в парогенераторі енергоблоку 1000 МВт атомної електричної станції». Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2020; 31 (70) Ч. 2 № 1: 40–45. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.1-2/08>.

– Petik, T., Vataman, V. & Beglov, K. “Simulation of pressurized water reactor to find the best control solution”. Energy Engineering and Control Systems. 2021; 7 (2): 126–135. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2021.02.126>.

– Vataman, V., Petik, T. & Beglov, K. “Mathematical model and method for automated power control of a nuclear power plant”. Electronic Modeling. 2022; 44 (4): 28–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.04.028>.

– Beglov, K. V., Odrekhovska, Y. O., Petik, T. V. & Vataman, V. V. “A method for searching the best static program for nuclear power unit control in the event of perturbations of different nature”. Herald of Advanced Information Technology. 2023; 6 (2): 139–151. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.9>.

– Beglov, K. V., Petik, T. V. & Vataman, V. V. “Analysis of models of an automatic power control system for a pressurized water reactor in dynamic mode with a change in the static control program”. Proceedings of Odessa Polytechnic University. 2023; 1 (67): 60–72. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.67.2023.08>.

– Petik, T., Lobachev, M., Yavorskyi, O. & Holey, V. “Automatic Control System for Changing the Power of a Nuclear Power Unit”. Electrotechnic and Computer Systems. 2023; 38 (114): 40–45. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.38.114.2023.5>.

– Петік, Т. В. & Лобачев, М. В. «Пошук меж представлення внутрішніх збурень активної зони ВВЕР-1000 у вигляді фізико-математичної та апроксимаційної моделей». Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2024; 39 (115): 55–64. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.39.115.2024.6>.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.**

Ступінь обґрунтованості наукових положень є достатньо високим, що підтверджується коректно сформульованою метою роботи, яка полягала у визначенні умов безпечної експлуатації та забезпечення керованості, а також сталості виробництва енергії в ядерній енергетичній установці при перехідних процесах в реакторі за рахунок удосконалення математичних моделей та методів оптимізації автоматизованої системи управління потужністю ядерної енергетичної установки з ВВЕР-1000, з застосуванням меж використання представлення внутрішніх збурень активної зони.

По-перше ступінь обґрунтованості наукових положень доведено сформульованими завданнями дисертаційного дослідження:

– удосконалити тривимірну математичну модель активної зони ядерного реактора типу ВВЕР, для можливості розрахунку вектору керуючого впливу на основі характеристики гомогенного і гетерогенного поглиначів нейтронів;

– удосконалити метод автоматизованого управління плановою зміною потужності ЯЕУ з ВВЕР–1000 на базі математичної моделі реактивності активної зони;

– розробити схему автоматизованої системи управління для циклічного навантаження при змінні температурного поля ядерного реактора на базі різних моделей математичного уявлення для відомих статичних програм регулювання;

– знайти межу використання представлення існуючих внутрішніх збурень активної зони у вигляді фізико-математичної або апроксимаційної моделей для використання в імітаційному моделюванні для аналізу структур керування.

По-друге, ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій доведено застосованими методами та моделями дослідження.

Для вивчення показників ефективності та безпеки реактора ВВЕР-1000 в перехідних режимах та аналізу існуючих систем автоматичного регулювання використовувалося наукове узагальнення й систематизація. При розробці математичної моделі реактора використовувалися теоретичні засади формування

рівнянь матеріального балансу та чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь. Для розробки та дослідження автоматизованої системи керування використовувалися методи імітаційного моделювання та теорії автоматичного керування. Пошук меж використання математичних моделей урахування внутрішніх збурень ЯЕУ включав числові методи аналізу та узагальнення результатів, а також апроксимацію експериментальних даних для побудови спрощених моделей.

#### **По дисертаційній роботі є зауваження:**

1. На сторінці 66 наводяться параметри, що найбільше впливають на ефективність АЕС, але ці параметри не враховуються під час моделювання енергоблоків. Було б доцільно дослідити вплив вказаних параметрів на роботу енергоблоку та додати їх до математичної моделі.

2. При описі регульованих параметрів блок-схеми реактора (рис. 3.1) позначення температури палива в  $i$ -й зоні у тексті не співпадає з позначенням даної змінної на рисунку.

3. У четвертому розділі наведені таблиці та графіки, що відображають результати моделювання та порівняння двох моделей, а також є певні словесні пояснення отриманих результатів. Але для проведення повного аналізу не вистачає наочного відображення меж використання математичних моделей.

4. У тексті дисертаційної роботи зустрічаються стилістичні неточності та аббревіатури без попереднього розшифрування.

Наведені зауваження ніяким чином не знижують високий науковий рівень роботи та її наукову і практичну цінність.

#### **Рівень виконання поставленого наукового завдання.**

Високий рівень поставленого наукового завдання полягає у розробці безпечних умов експлуатації і забезпечення керованості та сталості виробництва енергії в ядерній енергетичній установці при перехідних процесах в реакторі за рахунок удосконалення математичних моделей та методів оптимізації автоматизованої системи управління потужністю ядерної енергетичної установки з ВВЕР-1000, які застосовують межі використання представлення існуючих внутрішніх збурень активної зони, а також доводиться наступними чинниками.

*Зв'язком проведених здобувачем досліджень з:*

– планами, затвердженими Міністерством освіти і науки України в Національному університеті «Одеська політехніка», та держбюджетними НДР за темами: «Підвищення ефективності комп'ютерно-інтегрованих систем управління (КІСУ) за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів», НДР № 235-47 (№0123U102484) і «Розробка моделі і методу ефективного керування експлуатацією енергоустановок від поновлюваних джерел енергії для забезпечення балансу енергосистеми», НДР № 205-55 (№0122U000565).

*Відсутністю порушення академічної доброчесності.*

Одним з об'єктивних елементів доказу відсутності порушення академічної доброчесності є публікації Петік Т. В. в рецензованих журналах, які перевіряють подані публікації на відсутність запозичень. Крім того, підтвердженням дотримання автором вимог академічної доброчесності є протокол програми

StrikePlagiarism від 21.04.2024 року. Представлений протокол опрацьовано фахівцями кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій та членами групи забезпечення підготовки докторів філософії по ОНП за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», які зробили висновок, що дисертаційна робота відповідає нормам академічної доброчесності. В цілому при підготовці відгука в тексті дисертації не було знайдено порушення академічної доброчесності.

*Повнотою викладення результатів досліджень в наукових публікаціях за темою дисертації.*

Наукові результати дисертації викладені у публікаціях і у повній мірі відображають основні результати дослідження. Результати наукових досягнень викладено у 8 друкованих працях у спеціалізованих наукових виданнях, рекомендованих МОН України, а також 5 тезах міжнародних конференцій.

Кількість публікацій за темою дисертаційної роботи та часовий інтервал, протягом якого вони публікувалися, достатньо великі. У наведених роботах достатньо повно відображені основні наукові положення дисертації. При оприлюдненні наукових результатів було дотримано вимоги «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», згідно з Постановою КМ України №44 від 12.01.2022, зі змінами, внесеними відповідно до Постанови КМ України № 341 від 21.03.2022, Постановою КМ України № 502 від 19.05.2023 та Постановою КМ України № 507 від 03.05.2024.

*Значимістю отриманих результатів для практичного використання.*

На основі дисертаційного дослідження можливе вдосконалення комп'ютерної системи автоматизації АЕС з ВВЕР при зміні навантаження ядерного реактора за рахунок інтеграції в імітаційну структурну модель уявлення меж використання апроксимаційної або фізико-математичної моделей, які в залежності від умов сталості розв'язують задачу керування, що дає можливість мінімізувати поточні зовнішні та внутрішні збурення.

Практичні положення дисертаційного дослідження впроваджено в Національному університеті «Одеська політехніка» при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» в Інституті штучного інтелекту та робототехніки (ІШІР) на кафедрі «Програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій» при викладанні наступних дисциплін: Автоматизація виробничих процесів; Моделювання процесів і систем; Сучасні системи керування; Оптимальні та адаптивні системи управління.

### **Оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності.**

Автор дисертаційної роботи на тему «Удосконалення АСУ ТП за рахунок пошуку меж використання математичних моделей урахування внутрішніх збурень ЯЕУ» Петік Тая Володимирівна оволоділа методологією наукової діяльності, яка відповідає ОНП 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», що доведено отриманими науковими результатами, які викладено у науковій новизні. Методологія наукового пізнання, яку застосовано при розв'язанні основних задач у відповідності до мети роботи, узгоджується з ціллю освітньо-наукової програми

ОНП 3-го рівня спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Отримані наукові результати дисертаційної роботи відповідають програмним, предметним, фаховим і інноваційним компетентностям ОНП спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

### **Оцінка дисертації в цілому.**

Вважаю, що дисертаційна робота Петік Таї Володимирівни «Удосконалення АСУ ТП за рахунок пошуку меж використання математичних моделей урахування внутрішніх збурень ЯЕУ» та наукові публікації, в яких викладено її основні результати, мають високий науковий рівень. Робота за своїм змістом та оформленням задовольняє чинним вимогам і є завершеним самостійним науковим дослідженням, в якому є нові науково-обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують складну актуальну науково-технічну задачу, яка полягає у розробці умов безпечної експлуатації і забезпечення керованості та сталості виробництва енергії в ядерній енергетичній установці при перехідних процесах у реакторі. Розв'язання даної науково-технічної задачі можливе за рахунок удосконалення математичних моделей та методів оптимізації автоматизованої системи управління потужністю ядерної енергетичної установки з ВВЕР-1000, які використовують межі використання представлення існуючих внутрішніх збурень активної зони.

Дисертаційна робота відповідає ОНП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» за спеціальністю 151.

Науковий рівень дисертаційної роботи та наукових публікацій здобувача відповідають вимогам п.п. 5-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», згідно з Постановою КМ України №44 від 12.01.2022, зі змінами, внесеними відповідно до Постанови КМ України № 341 від 21.03.2022, Постановою КМ України № 502 від 19.05.2023, та Постановою КМ України № 507 від 03.05.2024, оскільки наведені в роботі науково обґрунтовані результати у сукупності вирішують актуальну наукову задачу.

Вважаю, що Петік Тая Володимирівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», галузь знань: 15 «Автоматизація та приладобудування».

### **Офіційний опонент**

Професор кафедри інтелектуальних  
інформаційних систем  
Чорноморського Національного університету  
імені Петра Могили  
доктор технічних наук, доцент

Олексій КОЗЛОВ