

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Київський
авіаційний інститут»

доктору технічних наук, професору кафедри
аеронавігаційних систем факультету
аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Ларіну Віталію Юрійовичу

РЕЦЕНЗІЯ

**доктора технічних наук, доцента, професора кафедри авіоніки
та систем управління факультету електроніки та телекомунікацій
Національного університету «Київський авіаційний інститут» Чіковані
Валерія Валеріановича на дисертаційну роботу
Солдатова Володимира Вікторовича «Математичні моделі, методи та
метрологічна атестація засобів при вимірюванні часу та частоти»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
у галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за
спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»**

Актуальність дисертаційної роботи

В умовах активного розвитку цифрових сервісів в державі. Дисертаційна робота Солдатова В. В. присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі, забезпеченню метрологічної достовірності, простежуваності та захищеності електронної позначки часу (timestamp). В умовах стрімкої цифровізації економіки, розвитку мереж 5G/6G, Smart Grid та вимог Регламенту eIDAS, наносекундна точність синхронізації стає критичним фактором безпеки.

. Особливої актуальності робота набуває у зв'язку з вразливістю ГНСС-сигналів до імітаційних атак (спуфінгу та меаконінгу), що вимагає розробки нових математичних моделей та методів верифікації часу з використанням національної інфраструктури диференціальної корекції (НСДК)

Точний час є необхідним для координації енергосистем (запобігання аваріям), керування транспортом (авіація, залізниця), функціонування промислових систем SCADA та систем національної оборони.

Телекомунікації та цифрові технології: Синхронізація мереж забезпечує стабільну передачу даних у стандартах 5G/6G, роботу Інтернету речей (IoT) та безпеку банківських транзакцій, кібербезпека та право: Електронна позначка часу (timestamp) слугує основою для юридичної атестації цифрових доказів та фіксації інцидентів кібербезпеки

Проблема дослідження: Сучасні методи синхронізації (NTP, стандартні GNSS) часто не забезпечують необхідної метрологічної стабільності та захисту від зовнішніх збурень, таких як іоносферні затримки, багатопроменевість, а також навмисні атаки — спуфінг та меаконінг. Існуючі в Україні комерційні сервіси часто не мають документально підтвердженого

ланцюга простежуваності до національного еталона, що робить їх використання в юридично значущих операціях неможливим.

Таким чином, тема дисертації є надзвичайно актуальною, оскільки вона вирішує важливу науково-технічну задачу — створення науково обґрунтованого методу контролю точності та простежуваності часу, що є критичним для національної безпеки, кіберзахисту та цифрової економіки України та проведення метрологічної атестації засобів при вимірюванні часу та частоти.

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

Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Державного університету «Київський авіаційний інститут», відповідно до Закону України №3715-VI «Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні», зокрема «Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки». Солдатов В.В.. був керівником Науково-дослідної роботи за держзамовленнями, зокрема:

НДДКР 0119U001695 «Удосконалення державного первинного еталона одиниць часу і частоти ДЕТУ 07-01-97» (2019 р.);

НДДКР 0119U001693 «Дослідження стабільності відтворення та зберігання одиниць часу і частоти та шкал часу» (2019 р.);

НДДКР 0120U000366 (2020 р.), НДДКР 0121U110523 (2021 р.),

НДДКР 0122U200899 (2022 р.), НДДКР 0123U102685 (2023 р.),

НДДКР 0124U002333 (2024 р.) – усі спрямовані на дослідження стабільності шкал часу та вдосконалення державного еталона ДЕТУ 07-01-97.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації

Дисертаційне дослідження Солдатов В.В.. характеризується глибиною та комплексністю, охоплює широкий спектр науково-технічних завдань. Пропозиції, що викладені у дисертаційному дослідженні, змістовно та послідовно обґрунтовані. Робота є логічною, матеріал структурованим, а поставлені завдання є чіткими. Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій доведена обґрунтованістю прийнятих припущень, використанням апробованих методів теоретичних досліджень, встановленням адекватності результатів теоретичних досліджень експериментальним даним. Це підтверджує високий рівень наукової обґрунтованості положень дисертації.

Найбільш суттєві наукові результати, що містяться в дисертації

Вперше розроблено науково обґрунтований підхід до підвищення точності вимірювань. Здобувачем створено апаратно-програмний прототип Qualified TSA з інструментальною точністю ≤ 10 нс. Результати впроваджено у в/ч А-4608 та ННЦ «Інститут метрології», а економічний ефект від

масштабування оцінюється у 15,8 млн USD. Розроблено COY та ТУ на сервери точного часу вимірювальних систем.

Практичні результати є такими:

1. Створено прототип комплексу моніторингу електронної часової позначки з інструментальною точністю ≤ 10 нс.

2. Система повністю відповідає вимогам Регламенту eIDAS та стандарту ETSI EN 319 422, що дозволяє використовувати її для створення кваліфікованих електронних підписів (КЕП), зокрема у сервісах «Дія.Підпис», цифровій юриспруденції та банківських транзакціях.

3. Реалізовано повний метрологічний ланцюг простежуваності: UTC(BIPM) $\rightarrow$ UTC(UA) $\rightarrow$ ГЦ СЧЧ $\rightarrow$ НСДК $\rightarrow$ локальний timestamp, Запропоновано методику метрологічної атестації систем на базі ГНСС як вторинних еталонів часу відповідно до ISO/IEC 17025 та рекомендацій BIPM, що спрощує їх сертифікацію та впровадження у державний реєстр ЗВТ.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи підтверджується актами впровадження у науково-дослідну діяльність та навчальний процес кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету, а також у виробничі процеси ДП. ННЦ Інститут метрології, Харків, Україна під час модернізації Національний (державний первинний) еталон одиниць часу та частоти НДЕТУ TF-01-2021.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці науково обґрунтованого підходу до підвищення точності вимірювань. Здобувачем створено апаратно-програмний прототип Qualified TSA з інструментальною точністю ≤ 10 нс. Результати впроваджено у в/ч А-4608 та ННЦ «Інститут метрології», а економічний ефект від масштабування оцінюється у 15,8 млн USD. Розроблено COY та ТУ на сервери точного часу вимірювальних систем.

Практичні результати є такими:

1. Створено прототип комплексу моніторингу електронної часової позначки з інструментальною точністю ≤ 10 нс.

2. Система повністю відповідає вимогам Регламенту eIDAS та стандарту ETSI EN 319 422, що дозволяє використовувати її для створення кваліфікованих електронних підписів (КЕП), зокрема у сервісах «Дія.Підпис», цифровій юриспруденції та банківських транзакціях.

3. Реалізовано повний метрологічний ланцюг простежуваності: UTC(BIPM) $\rightarrow$ UTC(UA) $\rightarrow$ ГЦ СЧЧ $\rightarrow$ НСДК $\rightarrow$ локальний timestamp, Запропоновано методику метрологічної атестації систем на базі ГНСС як вторинних еталонів часу відповідно до ISO/IEC 17025 та рекомендацій BIPM, що спрощує їх сертифікацію та впровадження у державний реєстр ЗВТ.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи підтверджується актами впровадження у науково-дослідну діяльність та навчальний процес кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету, а також у виробничі процеси ДП. ННЦ Інститут метрології, Харків, Україна під час модернізації Національний (державний первинний) еталон одиниць часу та частоти НДЕТУ TF-01-2021.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому

Структура дисертації є обґрунтованою та логічно вмотивованою, включає чотири розділи з висновками по кожному розділу, загальні висновки, додатки, що доповнюють основний зміст дисертації.

У першому розділі висвітлено аналіз сучасного стану систем електронної часової позначки та метрологічного забезпечення їх простежуваності до UTC. У розділі проведено порівняльний аналіз стандартів синхронізації (NTP, PTP, White Rabbit), класифіковано джерела похибок (систематичні, детерміновані, випадкові) та обґрунтовано недоліки традиційних методів у контексті вразливості до спуфінгу. Оцінено потенціал Національної системи диференціальної корекції (НСДК) як унікального фізично незалежного каналу верифікації часу.

У другому розділі викладено та Математично обґрунтовано порогове правило детекції аномалій на рівні 12 нс. Розглянуто теоретичні основи та розроблено метод моніторингу електронної позначки часу. Побудовано розширену математичну модель, яка вперше враховує іоносферні затримки 2-го порядку та міжсистемні часові зсуви (GGTO/BGTO), що дозволило деталізувати бюджет невизначеності на рівні $\sigma \delta t \leq 2,4$ нс. Описано алгоритм розширеного фільтра Калмана (EKF) з 10-мірним вектором стану та впроваджено метод діагностики цілісності часового каналу на основі сингулярного розкладу (SVD) матриці Якобіана..

У третьому розділі роботи присвячений експериментальному обґрунтуванню вдосконаленого методу та метрологічній атестації системи. Наведено процедуру метрологічної атестації за методом ентропійних коефіцієнтів, що дозволило встановити розширену невизначеність системи $U = \pm 8,4$ нс ($k=2$). Представлено результати використання авторегресійних моделей (AR/ARIMA) та варіацій Аллана для аналізу стабільності рубідієвих стандартів частоти. Експериментально підтверджено досягнення точності формування часової позначки на рівні 5,9–6,3 нс (RMS) відносно UTC(UA).

У четвертому розділі. Описано трирівневу архітектуру системи (ГЦ СЧЧ — НСДК — TSA) та характеристики мобільного стандарту частоти FS017. Розділ присвячений практичному впровадженню результатів та перспективам розвитку національного сервісу довіреного часу. Наведено результати дослідної експлуатації на об'єктах критичної інфраструктури та розраховано

економічний ефект, який при масштабуванні на 100 вузлів становить понад 15,8 млн USD протягом 10 років.

Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації в опублікованих працях

Основні положення дисертаційного дослідження знайшли відображення у публікаціях Солдатова В.В., кількість яких відповідає чинним вимогам. Основні положення дисертації опубліковані

Повнота викладення в опублікованих працях отриманих результатів не викликає сумнівів. Здобувачем за темою дисертаційної роботи було опубліковано 6 наукових публікацій, серед них 6 публікацій у наукових фахових виданнях України, 4 із них у виданнях проіндексованих у базі даних Web of Science, 7 публікацій у збірниках матеріалів конференцій.

Брав безпосередню участь у виконанні окремих розділів, присвячених математичному моделюванню похибок вимірювання та розробці алгоритмів їх автоматичної корекції, а також виступав керівником робіт НДДКР за держзамовленням.

Отримані результати дисертації органічно узгоджуються з основними положеннями державних і міжнародних програм розвитку метрологічного забезпечення та інтеграційних процесів України до співдружності європейських держав, що підтверджує їх наукову новизну, практичну значущість та відповідність стратегічним пріоритетам у сфері стандартизації та гармонізації вимірювальних систем.

Проміжні та кінцеві результати публікувалися протягом 2022–2025 рр. Друковані праці вичерпне відображають наукові положення, висновки і рекомендації дисертації.

Слід відзначити, що здобувач сформулював цілісний науковий апарат дослідження, з належним визначенням його елементів: об'єкта, предмета, мети, завдань дослідження, які у процесі послідовного рішення одержали вичерпні формулювання. Кожен розділ дисертації має власну наукову значущість, слугує науковим підґрунтям для наступного розділу та в результаті об'єднання усіх розділів формується цілісне наукове дослідження.

Відсутність (наявність) порушень академічної доброчесності

Аналіз дисертації та наукових публікацій Солдатова Володимира Вікторовича, у яких висвітлено основні наукові результати дослідження, не дає підстав припускати, що в них мають місце порушення академічної доброчесності (академічний плагіат, самоплагіат, фабрикація, фальсифікація). У разі використання ідей, тверджень, відомостей із зовнішніх джерел інформації, у роботі є на них посилання, що відповідає нормам законодавства про авторське право та суміжні права.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації

Високо оцінюючи новизну, теоретичне та практичне значення дисертаційного дослідження, що рецензується, необхідно висловити наступні зауваження та побажання.

1. Методологія атестації ГНСС-систем як вторинних еталонів запропонована в роботі є досить трудомісткою. Було б доцільно розглянути можливість повної автоматизації цього процесу через хмарні сервіси НСДК, що дозволило б проводити верифікацію часових позначок у реальному часі для віддалених користувачів.

2. Стійкості самої мережі НСДК до масованих атак на канали зв'язку (NTRIP-кастери) потребує доопрацювання, за твердженням НСДК забезпечує 100-% виявлення спуфінгу при $\Delta t \geq 20$ нс. Проте залишається дискусійним питання стійкості самої мережі НСДК до масованих атак на канали зв'язку (NTRIP-кастери), що може стати «єдиною точкою відмови» для всієї системи моніторингу.

3. Для підтвердження ефективності автоматизованої корекції похибок бажано навести порівняльні графіки до/після застосування алгоритмів, для реальних умов застосування.

4. Варто було б розширити аналіз впливу атмосферного впливу активності на поріг спрацьовування детектора спуфінгу для умов екстремальних іоносферних збурень.

5. У бажано було б чіткіше висвітлити питання обмеження пропускну здатності каналів зв'язку при масовому запиті часових позначок у реальному часі.

Робота має значний науковий і прикладний потенціал. Врахування зауважень дозволить підвищити її теоретичну обґрунтованість та практичну корисність для галузі метрології.

Зауваження до дисертації не знижують позитивної оцінки, проте можуть використовуватися під час дискусії на захисті дисертації, а також бути стимулом для подальшої наукової роботи авторки. Зміст роботи, логіка тексту, наукові та практичні результати свідчать про теоретичні знання, володіння методами наукових досліджень, уміння розв'язувати актуальні задачі.

Загальний висновок

Дисертаційне дослідження Солдатова Володимира Вікторовича «Математичні моделі, методи та метрологічна атестація засобів при вимірюванні часу та частоти» є теоретично і методологічно обґрунтованим, має безперечну наукову новизну, теоретичну і практичну значущість, є завершеним самостійним дослідженням. надає аргументовану відповідь на потребу впровадження методу моніторингу часової позначки на основі синтезу даних багатосистемного ГНСС-прийому та національної системи диференціальної корекції (НСДК).

Дисертація відповідає спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та затвердження рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р.

№44, а її автор – Солдатов Володимир Вікторович – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

Рецензент

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри авіоніки
та систем управління факультету
аеронавігації, електроніки
та телекомунікацій
Національного університету
«Київський авіаційний інститут»



Валерій ЧІКОВАНІ

