

Сичков В.С.

Національний університет «Одеська політехніка»

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОФЕСІЙНОГО НАСТРОЮВАННЯ АКУСТИЧНИХ СТРУННИХ МУЗИЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ: ЕКСПЕРТНИЙ ПОГЛЯД

Статтю присвячено проблемі автоматизації професійного настроювання акустичних струнних музичних інструментів, зокрема фортепіано, з фокусом на створенні якісного програмного забезпечення, здатного відповідати високим вимогам майстрів-настроювачів. Підкреслено міждисциплінарний характер завдання, яке поєднує фізичне і математичне моделювання, психоакустичні аспекти, оптимізаційні механізми, цифровий аналіз і оброблення сигналів та програмну інженерію.

У статті розглянуто обмеження сучасних електронних тюнерів – як апаратних, так і програмних – та доведено, що вони наразі не спроможні повноцінно замінити слухове настроювання, яке базується на досвіді професійних техніків. Розкрито сучасні наукові підходи до автоматизації процесу настроювання, серед яких – застосування навчання з підкріпленням, мінімізації глобальної спектральної ентропії, параметричного моделювання негармонічності струн та аналізу суб'єктивного сприйняття звуку.

Здійснено аналіз публікацій, технічних блогів, професійних форумів та позицій провідних настроювачів, зокрема членів Гільдії фортепіанних техніків (PTG), на підставі якого виокремлено типові проблеми сучасних програм: накопичення похибок у розрахунках, обмежена точність настроювання унісонів, недостатня стабільність настроювання, відсутність належного зворотного зв'язку та погана адаптація до реальних акустичних умов.

Визначено, що створення якісного програмного забезпечення можливе лише за умови активної участі фахівців із настроювання на критичних етапах життєвого циклу його розроблення – формулюванні вимог, валідації результатів і подальшому підтримуванні системи. Запропоновано низку заходів для поліпшення якості таких рішень. З'ясовано, що лише комплексний підхід, який поєднує технологічні досягнення з емпіричними знаннями й навичками майстрів-настроювачів, здатен забезпечити створення тюнерів, що відповідатимуть високим стандартам якості настроювання і викликатимуть довіру професійних користувачів.

Ключові слова: програмне забезпечення для настроювання, електронні тюнери, слухове настроювання, експертні знання, негармонічність, фортепіано.

Постановка проблеми. Автоматизація професійного настроювання акустичних струнних музичних інструментів, зокрема розроблення відповідного високоякісного програмного забезпечення, залишається складним міждисциплінарним науково-прикладним завданням. Ця сфера охоплює психоакустику, моделювання, оптимізацію, цифрове оброблення сигналів та інженерію програмного забезпечення.

Сучасні тюнери – як окремі електронні прилади, так і спеціалізоване програмне забезпечення для мобільних пристроїв – позиціонуються як професійні рішення для настроювання ударно-клавішних інструментів (піаніно і роялів). Вони істотно відрізняються від простих хроматичних тюнерів, що реагують лише на основну частоту

акустичного сигналу, оскільки враховують багатший спектральний склад і специфіку звучання фортепіано.

Попри це, значна частина досвідчених фахівців – фортепіанних техніків (майстрів-настроювачів) – вважає, що сучасні тюнери не здатні забезпечити такий самий рівень якості настроювання, як настроювання на слух (слухове настроювання). У професійній практиці тюнери часто використовують як допоміжний інструмент, зокрема для прискорення окремих етапів роботи, однак кінцеву валідацію настроювання все одно здійснюють на слух, тому оптимальним вважають поєднання обох підходів. Проте якщо оцінювати настроювання, виконане виключно за тюнером, «з нуля» (без додаткових налаштувань приладу або

програми), то його здатність вибудовувати якісну температуру, яка б відповідала професійним стандартам і була б схвалена більшістю настроювачів, наразі залишається обмеженою.

Водночас існує дещо інша точка зору: деякі експерти вважають, що тюнери вже досягли достатньої точності та надійності, щоб забезпечувати з ним практично однаково високий результат. У цьому контексті критика з боку традиційних майстрів часто розглядається як консерватизм і є радше наслідком професійних упереджень. Також вона часто зумовлена недостатнім усвідомленням того, що сучасні тюнери вже значно перевершують перші прилади, здатні враховувати негармонічність та інші складні слухові критерії.

Ключова складність автоматизації настроювання полягає в тому, що для фортепіано неможливо задати єдину «ідеальну» температуру через негармонічність струн та кожен інструмент відрізняється один від одного. Алгоритми програмного забезпечення для електронних настроювальних пристроїв і мобільних застосунків мають враховувати не лише прості тональні співвідношення, а й складні психоакустичні ефекти, а також конструктивні й фізико-акустичні особливості інструментів. Це значно ускладнює створення програм, які могли б повністю відповідати очікуванням і критеріям майстрів-настроювачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження питань автоматизації настроювання музичних інструментів підкреслюють як актуальність, так і складність цієї проблеми. Основну увагу в наукових працях приділено моделюванню акустичних властивостей інструментів, зокрема негармонічності струн, та вивченню критеріїв людського слухового сприйняття.

Авторами [1] запропоновано автоматичну систему настроювання фортепіано під назвою "PitchImpact", яка використовує навчання з підкріпленням для керування спеціальним регульованим настроювальним ударним ключем. Система використовує програмне забезпечення аналізу акустичного спектру для визначення похибки висоти та відповідної сили удару і напрямку, необхідних для настроювання кожної струни інструмента. Потім агент визначає відповідне налаштування удару по ключу, щоб відрегулювати вірбелі та настроїти струну. Експерименти з системою на тестовому «гексакорді» показують, що вона може настроїти струни порівняно з навченим настроювачем-аматором за невелику кількість ударів. Система має потенціал, оскільки дозволяє власникам фортепіано самостійно настроювати інструменти

з мінімальним обладнанням, таким чином роблячи процес набагато зручнішим і доступнішим.

У статті [2] описано метод настроювання фортепіано, заснований на мінімізації глобальної спектральної ентропії. У ній зазначено, що сучасні музичні строї базуються на рівномірній температурі, але настроювання точно за нею може призвести до того, що інструменти звучать недобре через негармонічність обертонових спектрів. Професійні настроювачі компенсують це шляхом розтягнення певних інтервалів, ґрунтуючись на сприйнятті гармонік, що збігаються між тонами, як більш співзвучних. Початкові тести, що відтворюють криві настроювання реальних фортепіано, свідчать про те, що метод фіксує нерегулярні коливання висоти нот, подібні до високоякісного настроювання. Хоча він простий у реалізації, проте має суттєві обмеження та відкриті питання, які потребують подальших досліджень.

У роботі [3] запропоновано параметричну модель, що дозволяє спільно охарактеризувати негармонічність та настроювання фортепіано на всьому діапазоні нот. Коефіцієнт негармонічності моделюється з використанням двох асимптот, що відповідають басовим і дискантним штегам. Модель настроювання передбачає розтягнення октав, спричинене негармонічністю, а також вибір типу октави настроювачем. Представлено алгоритми для оцінки параметрів моделі за окремими нотами або акордами за умови, що ноти відомі. Модель вдало вловлює основні тенденції негармонічності та відхилень настроювання від рівної температури для різних типів фортепіано. Потенційними застосуваннями моделі є оцінка стану фортепіано, надання інформації для вибору кривих настроювання та параметризація настроювання синтезаторів фортепіано. Загалом робота демонструє змогу глобальної параметризації негармонічності та настроювання з використанням невеликої кількості фізично значущих параметрів.

У статті [4] представлено дослідження щодо розроблення автоматичного методу настроювання високих тонів фортепіано. Автори перевірили чотири простих правила настроювання октавних інтервалів шляхом зіставлення різних часткових частот нижнього і верхнього регістрів. Вони провели тест на прослуховування, щоб визначити, яке правило забезпечує найкраще настроювання, за оцінками слухачів. Тест показав, що найприємніше звучання високих октав було досягнуто тоді, коли перша гармоніка верхнього тону узгоджувалась із другою гармонікою

нижнього. Автори також запропонували новий метод оцінки якості настроювання шляхом аналізу частот биття між обертонами. Загалом дослідження спрямоване на розроблення повної системи автоматичного настроювання фортепіано, і це воно було зосереджено на пошуку оптимального правила настроювання високих тонів на основі людського сприйняття.

Публікації щодо розроблення та забезпечення якості програмного забезпечення для автоматизованого професійного настроювання акустичних струнних музичних інструментів практично відсутні, що підкреслює потребу в систематичних дослідженнях та створенні спеціалізованих рішень у цій галузі.

Постановка завдання. Метою статті є визначення ключових проблем програмного забезпечення для настроювання акустичних струнних ударно-клавішних музичних інструментів із погляду досвідчених користувачів на шляху до з'ясування причин, через які сучасні тюнери ще не можуть стати повноцінною альтернативою слуховому настроюванню. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати фахові статті, форуми, блоги і онлайн-курси та виокремити найвагоміші експертні судження щодо якості тюнерів і досвіду їх використання, а також на цій основі визначити необхідні заходи для побудови якісного програмного забезпечення для настроювання музичних інструментів.

Виклад основного матеріалу. Як зазначають автори [5], «сучасні системи вимірювання набагато точніші, ніж людський слух, [проте] слухове настроювання все ще вважається найкращим та найнадійнішим методом настроювання фортепіано». У роботі [4] підкреслено, що, незалежно від застосованого методу, саме люди зрештою визначають, яке настроювання звучить найкраще. Експерти, зокрема сертифіковані фортепіанні техніки (RPT, англ. *registered piano technician*), також наголошують, що електронний або програмний тюнер не може просто замінити слухові навички. Наприклад, сертифікація RPT від PTG (*Piano Technicians Guild*, або Гільдії фортепіанних техніків, – провідного світового джерела експертних знань у сфері обслуговування та технологій фортепіано) вимагає, щоб кандидати «продемонстрували здатність настроювати на слух, без допомоги електроніки», що демонструє слухове настроювання як незамінну складову професійної практики, попри технічний прогрес [6].

Асоційований член тієї ж Гільдії фортепіанних техніків Річард В. Буші у своєму блозі приводить

цікаву аналогію: «Електронні настроювальні пристрої в руках досвідченого настроювача можуть дати виняткові результати. Вони своєрідно нагадують високоякісні діагностичні інструменти, які сьогодні використовують автомеханіки. Особисто я б трохи побоювався залишати свій автомобіль у руках механіка, який використовував лише інструменти, доступні на той час, коли були винайдені автомобілі... або використовував лише стетоскоп для діагностики проблем із двигуном. Я хочу, щоб мій механік мав у своєму розпорядженні всі найновіші інструменти. Я також хотів би, щоб він знав, як правильно ними користуватися, але йому також краще знати більше, ніж просто основи ремонту автомобілів... не лише як читати те, що йому каже машина. Машини, коли вони правильно запрограмовані та налаштовані для поточного завдання, зазвичай дають правильні результати. Однак машини іноді можуть помилятися... і людина, яка інтерпретує роботу машини, **ПОВИННА** знати різницю» [7].

Також він підкреслює невисоку якість суто «машинного» настроювання: «... навіть якщо настроювач більш вправний у настроюванні на слух, деякі настроювачі, що настроюють виключно за допомогою тюнера, все ще мають «схильність» лінуватися та занадто покладатися на свій апарат, пропускаючи необхідні перевірки слуху. Якщо настроювач, наприклад, просто «зупиняє світло» на своєму апараті та не грає терції, кварта, квінти, сексти, октави тощо та не перевіряє їх (щоб довести, що ноти знаходяться на правильному місці), то він, найімовірніше, отримає в найліпшому разі посереднє настроювання» [7].

Отже, досвідчений настроювач має вміти ефективно користуватися будь-якими доступними інструментами – чи то камертоном, чи сучасними тюнерами – для досягнення найкращого результату. Якість настроювання залежить не стільки від самого інструмента, скільки від умінь майстра: з будь-яким засобом можна отримати як високоякісний, так і незадовільний результат. Загалом ту ж думку висловлюють і інші спеціалісти [8, 9]. Водночас удосконалення засобів настроювання сприяє підвищенню стабільності результатів, пришвидшенню процесу, зменшенню навантаження на слух та підвищенню доступності професійного настроювання для ширшого кола користувачів.

Детальний аналіз недоліків програмного забезпечення для тюнерів надає Марк Церізано (*Mark Cerisano*) – інженер, сертифікований фортепіанний технік і засновник Міжнародної школи

фортепіанних техніків (англ. *International Piano Technicians School, IPTS*). За його оцінкою, основні проблеми тюнерів полягають у використанні застарілих методів настроювання, а також у відсутності повноцінної підтримки процесу професійного слухового настроювання.

Зокрема, для досягнення бажаних поступових частот биття обертонів в послідовних однойменних консонансах – тобто під час вибудовування рівномірно темперованого строю – тюнерні алгоритми вдаються до складної багаторівневої апроксимації. Вона охоплює коливну частоту струни, коливні частоти її обертонів, коливну негармонічність цієї струни, коливної негармонічності всіх інших струн, коливної кривої розтягування інтервалів та, нарешті, основної частоти у зворотному напрямку вже від цієї апроксимованої кривої. Такий підхід спричиняє накопичення похибок, що, як наслідок, призводить до неточного строю, який не відповідає високим професійним вимогам настроювачів.

Натомість досвідчені настроювачі настроюють інструмент, слухаючи інтервали, тобто співвідношення частот двох тонів, і одразу визначають поступові частоти биття обертонів, враховуючи всі коливні процеси. Такий слуховий метод дозволяє значно зменшити загальну похибку, а вплив негармонічності зводиться до мінімуму природним чином.

Окрім того, сучасне програмне забезпечення зазвичай не забезпечує стабільного строю та демонструє обмежену здатність до точного настроювання унісонів [10, 11].

Додатково експерти наголошують на проблемах тюнерів із визначенням частот у низькому (басовому) і високому (дискантовому) діапазонах та їх чутливості до навколишнього шуму, реверберації (наприклад, концертного залу) та резонансів у самому музичному інструменті, що знижує точність аналізу акустичного сигналу. Також у численних обговореннях на форумах користувачі звертають увагу на недопрацювання окремих функцій наявного програмного забезпечення, зокрема, помилки у визначенні нот та відсутність оглядового інтерфейсу для візуалізації вже настроєних тонів. До потенційно корисних удосконалень можна віднести впровадження режиму аудіоізоляції для мінімізації впливу сторонніх зву-

ків, а також реалізація енергоефективних рішень, які б забезпечили більший час автономної роботи тюнера під час тривалих сесій настроювання [12-19].

Висновки. Автоматизація професійного настроювання акустичних струнних музичних інструментів залишається складним і ще не вирішеним завданням. Попри значний прогрес у розвитку електронних і програмних тюнерів, вони досі не здатні повною мірою забезпечити якість настроювання, яку демонструють досвідчені фахівці-настроювачі під час роботи на слух.

У цьому контексті використання експертних знань для керівництва розробленням програмного забезпечення є критично важливим. Досвідчені настроювачі знають, як поводитися акустичні фортепіано та які нюанси під час настроювання мають значення. Ігнорування знань майстрів у цій предметній області ризикують створенням неефективних застосунків, що не задовольняють професійні вимоги і не викликають довіри в цільовій аудиторії.

Для створення по-справжньому якісного програмного забезпечення для настроювання розробникам необхідно тісно співпрацювати з фахівцями на етапах формулювання вимог, перевірки якості та отримання зворотного зв'язку від користувачів, щоб програмна логіка й інтерфейс відповідали потребам і досвіду настроювачів. Інакше кажучи, сприйманий розрив у якості між настроюванням за допомогою тюнера і на слух робить вкрай важливим урахування думки експертів під час розроблення й оцінювання таких програм.

Отже, необхідними заходами для створення високоякісного програмного тюнера є вдосконалення фізико-акустичних моделей музичного інструмента, реалізація адаптивних слухових критеріїв оцінювання інтервалів, впровадження сучасних архітектурних рішень із модульною побудовою, підвищення точності аналізу й оброблення сигналів і розроблення інтуїтивного інтерфейсу з чітким зворотнім зв'язком. Не менш важливим є залучення сертифікованих настроювачів до процесів валідації та уточнення критеріїв якості звучання. Тільки на основі такого комплексного підходу можна розробити продукт, який реально підтримуватиме професійне настроювання музичних інструментів на належному рівні.

Список літератури:

1. Millard M., Tizhoosh H. R. Tuning pianos using reinforcement learning. *Applied Acoustics*. 2007; Vol. 68, Issue 5: 576–593. DOI: 10.1016/j.apacoust.2006.03.006.

2. Hinrichsen H. Entropy-based Tuning of Musical Instruments. *Brazilian Journal of Physics Teaching* (in Portugal). 2012. Vol. 34, Issue 2, No. 2301. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1806-11172012000200004>.
3. François R., Bertrand D., Laurent D. A parametric model and estimation techniques for the inharmonicity and tuning of the piano. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2013. Vol. 133, Issue 5. P. 3107–3118. DOI: 10.1121/1.4799806.
4. Shah S., Välimäki V. Automatic Tuning of High Piano Tones. *Applied Sciences*. 2020; Vol. 10, Issue 6, No. 1983. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10061983>.
5. Szwajcowski A., Pilch A. Optimization of piano tuning by means of spectral entropy minimization. *Applied Acoustics*. 2020. Vol. 166. 107359 p. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107359.
6. What is a Registered Piano Technician (RPT)? Piano Technicians Guild. URL: <https://www.ptg.org/about/registered-piano-technician> (date of access: 18.07.2025).
7. Bushey R. Tuning Fork or Electronic Tuning Device (ETD)? Richard's Piano Svc Blog. URL: <https://surl.li/zdxups> (date of access: 18.07.2025).
8. Glenn P. ETD tuning vs. aurally. Tuning, Glenn's Piano Service. URL: <https://bleespiano.com/etd-tuning-vs-aurally> (date of access: 18.07.2025).
9. Porter, J. Aural vs. electronic piano tuning. Fine Tuning. URL: <https://finetuningco.com/blog/aural-vs-electronic-piano-tuning> (date of access: 18.07.2025).
10. International Piano Technicians School – Online Training for Piano Technicians. URL: <https://internationalpianotechniciansschool.com> (date of access: 21.07.2025).
11. Cerisano M. How to Tune Pianos: The Hobby, Skill, and Career of Piano Tuning. URL: <https://howtotunepianos.com> (date of access: 21.07.2025).
12. Vrz S. Microphone suggestion for piano tuning using mobile app. Music: Practice & Theory Stack Exchange. URL: <https://surl.li/cwxqrm> (date of access: 23.07.2025).
13. MoreBandicoot4833. How accurate are built in cellphone microphones when used with piano tuning apps? Reddit. URL: <https://surl.li/obfmit> (date of access: 23.07.2025).
14. Kelly A. Reliable Frequency Detection Using DSP Techniques. AUTODESK Instructables. URL: <https://surl.cc/cyaikx> (date of access: 23.07.2025).
15. Truitt W. Tunelab Problems. Pianotech. URL: <https://my.ptg.org/discussion/tunelab-problems> (date of access: 25.07.2025).
16. RonTuner. PianoMeter follow up. Piano World Piano & Digital Piano Forums. URL: <https://surl.li/wuqylc> (date of access: 25.07.2025).
17. Verituner User Reviews. AppsHunter.io. URL: <https://appshunter.io/ios/app/449411468/reviews> (date of access: 28.07.2025).
18. Wilke C., Richly S., Götz S., Piechnick C., Aßmann U. Energy Consumption and Efficiency in Mobile Applications: A User Feedback Study. *2013 IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing*. Beijing: China. 2013. P. 134–141. DOI: 10.1109/GreenCom-iThings-CPSCoM.2013.45.
19. The Importance of Battery Optimization in Mobile Apps. PixelTech. URL: <https://pixeltech.ai/the-importance-of-battery-optimization-in-mobile-apps> (date of access: 28.07.2025).

Sychkov V.S. SOFTWARE FOR AUTOMATED PROFESSIONAL TUNING OF ACOUSTIC STRING MUSICAL INSTRUMENTS: AN EXPERT VIEW

The article is devoted to the problem of automation of professional tuning of acoustic string musical instruments, in particular pianos, with a focus on creating high-quality software capable of meeting the high requirements of master tuners. The interdisciplinary nature of the problem, which combines physical and mathematical modeling, psychoacoustic aspects, optimization mechanisms, digital signal analysis and processing, and software engineering, has been emphasized.

The limitations of modern electronic tuning devices (ETDs) – both hardware and software – have been considered in the article, and it has been proven that they are currently unable to fully replace aural tuning, which is based on the experience of professional technicians. Modern scientific approaches to automating the tuning process have been disclosed, including the use of reinforcement learning, minimization of global spectral entropy, parametric modeling of string inharmonicity, and analysis of subjective sound perception.

An analysis of publications, technical blogs, professional forums and opinions of leading registered technicians, in particular members of the Piano Technicians Guild (PTG), has been carried out, on the basis of which typical problems of modern programs have been identified: accumulation of errors in calculations, limited accuracy of unison tuning, insufficient tuning stability, lack of proper feedback and poor adaptation to real acoustic conditions.

It has been determined that the creation of high-quality software is possible only with the active participation of tuning specialists at critical stages of its development life cycle – specification of requirements, validation of results and subsequent maintenance of the system. A number of measures have been proposed to improve the quality of such solutions. It has been concluded that only a comprehensive approach combining technological achievements with empirical knowledge and skills of master tuners is able to ensure the creation of ETDs that will meet high tuning quality standards and will inspire the trust of professional users.

Key words: *tuning software, electronic tuning devices, aural tuning, expert knowledge, inharmonicity, piano.*

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 07.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025