ROCZNIKI POLSKIEGO TOWARZYSTWA MATEMATYCZNEGO
Seria II: WIADOMOŚCI MATEMATYCZNE XXVIII (1988)

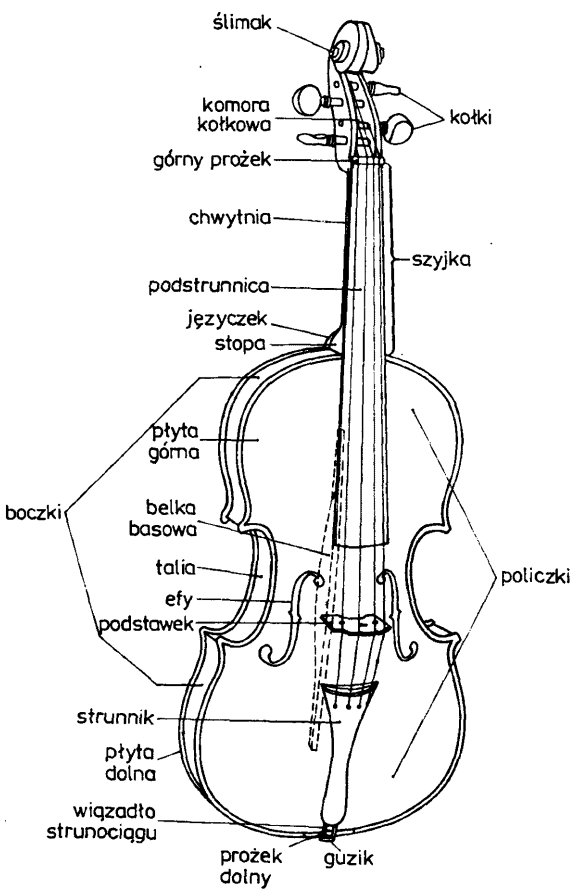
wmptm 1897

BOGDAN SKALMIERSKI (Gliwice)

Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Jak matematyka doskonali skrzypce

Skrzypce to instrument, który obok organów, harfy czy fortepianu należy do najwspanialszych. Skrzypce fascynują tak swoim głosem, jak i wyglądem, który zdradza prostą konstrukcję. Elementy, z jakich składają się skrzypce, wyszczególniono na rysunku 1.



Rys. 1

Skrzypce, wokół których powstało tyle mitów, osobliwie frapują swoją zagadkowością. Podstawową kwestią jest brzmienie skrzypiec, które w dwóch identycznie zrobionych egzemplarzach może być diametralnie różne. A więc dwa identyczne instrumenty dają rozpoznać się jedynie przez swój dźwięk. Może się zdarzyć, że wśród tych dwóch istrumentów jeden jest np. wierną kopią Stradivariusa, a drugi oryginałem. Takie doświadczenia były robione, ale nigdy wierna kopia nie miała tych walorów akustycznych co oryginał. Pozostaje zatem pytanie, co — poza tym, co widzimy i czego możemy dotknąć — ma tak istotny wpływ na walory brzmieniowe skrzypiec.

Problem skrzypiec jest trudny, ponieważ ich produkcja była oparta na szesnastowiecznych eksperymentach dokonywanych bez jakichkolwiek głębszych rozważań teoretycznych. Przypuszczalnie wiadomo było, jak należy robić skrzypce, ale nie wiadomo było „dlaczego właściwie tak". Później przyszedł okres manufaktur, zgubny dla jakości instrumentów, gdyż — jak się wydaje — w dążeniu do zwiększenia produkcji zachowano z dawnych wspaniałych wzorów jedynie kształt, a często kartkę znanego lutnika starowłoskiego. Przypuszczalnie „racjonalizatorzy" tego okresu, nie rozumiejąc istoty sprawy, do tego stopnia uprościli technologię, że skrzypce straciły swoje piękne brzmienie i stały się bezwartościowymi pudełkami. Ta masowa produkcja falsyfikatów miała niewątpliwie wpływ na lutników, tak na ich poglądy na temat technologii, jak i na poziom wykonywanych instrumentów. Jeśli nawet któryś z lutników znał właściwy sposób wykonywania instrumentów, to strzegł zazdrośnie swej tajemnicy. Nieznajomość sensu właściwej technologii, pojawienie się technologii uproszczonej w licznych manufakturach oraz trudność w ocenie własności akustycznych instrumentów (brak odpowiedniej aparatury) — to prawdopodobnie główne przyczyny tego, że technologia XVII i XVIII wieku poszła w zapomnienie, stała się więc tajemnicą.

Czy budowa skrzypiec jest tajemnicą również współcześnie? Niektórzy lutnicy twierdzą, że tak nie jest, bo ich instrumenty dorównują wzorom klasycznym. Takie twierdzenie jest ryzykowne chociażby dlatego, że nie ma możliwości dokonania takiego porównania, gdyż nie wiadomo, jaki dźwięk miały skrzypce 250 lat temu([1]), wiadomo natomiast, że każdy instrument po okresie swojej świetności wygasa. A zatem spór na temat istnienia lub nieistnienia tajemnicy lutników starowłoskich jest bezprzedmiotowy, natomiast można i powinno się dyskutować na temat wpływu różnych czynników na jakość instrumentu. Niezależnie od tego „tajemnica budowy skrzypiec" może być stosownym hasłem do badań nad skrzypcami.

Współczesna wiedza otwiera nowe możliwości, gdyż dość dobrze rozwinięte są takie dyscypliny naukowe, jak akustyka, teoria sprężystości, teoria układów

([1]) Warto dodać, że Antonio Stradivari zmarł w 1737 r. w Cremonie. W roku 1987 minęło więc 250 lat od jego śmierci (*przyp. red.*).

liniowo-sprężystych (układów Clapeyrona), fizjologia słuchu ludzkiego, a także pewne niezbędne działy matematyki i elektronicznej techniki obliczeniowej, oraz technika badań laboratoryjnych na nowoczesnej aparaturze.

Niewątpliwie badania powinny się rozpocząć od rozważań teoretycznych, gdyż one dają możliwości porządkowania faktów w zwartą całość; ścisłe ujęcie zagadnień otwiera drogę do głębszego poznania problemu i częściowo eliminuje zbędny trud eksperymentatora.

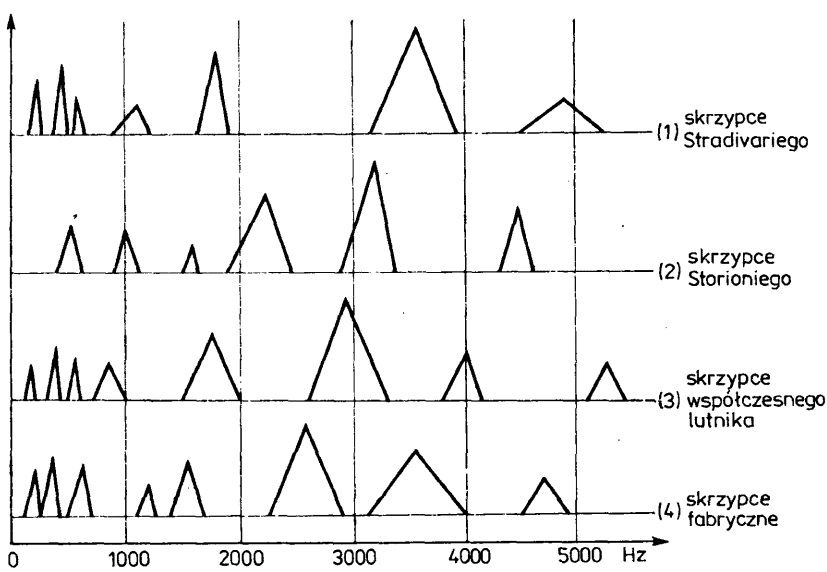
W roku 1977 rozpocząłem swe prace ([8]–[10], [13]–[16]) nad wyjaśnieniem przyczyn niepowodzeń współczesnych lutników. Była to dla mnie dość osobliwa przygoda życiowa, dająca ciekawe spostrzeżenia nie tylko natury naukowej. Pracę swoją musiałem rozpocząć od znalezienia odpowiedzi na pytanie: Co to znaczy dobry instrument? Jaka jest definicja dobrego instrumentu? Takie pytanie zadawałem wielu muzykom. Odpowiedzi były różne. Jednak wspólnie wszyscy podkreślali takie walory, jak nośność, piękna barwa oraz łatwa emisja dźwięku. Z punktu widzenia fizyka takie określenia niewiele mówią, istnieje jednak możliwość przełożenia tych pojęć na język wartości wymiernych.

A zatem co to znaczy, że instrument jest nośny? W kategoriach fizyki instrument jest źródłem akustycznym dźwięku. Źródło takie emituje pewien strumień energii. Zatem instrument nośny to taki, który jest w stanie wysyłać duży (średnio) strumień energii. Z rozważań nad strumieniem energii emitowanym przez źródło (instrument) zauważymy, że nośność jest w ścisłym związku z drugim walorem instrumentu, jakim jest barwa.

Trzecia cecha dobrego instrumentu to łatwość emisji dźwięku. Ta łatwość emisji dźwięku jest zmienna w czasie dla każdego instrumentu i okazuje się, że znaczniejsze zmiany w tym względzie dotyczą instrumentów lepszych: te potrzebują tzw. rozgrywania się, i to nawet po stosunkowo krótkim czasie „odpoczynku". Emisja zależy przede wszystkim od tłumienia wewnętrznego w pudle rezonansowym, a ono ulega wahaniom. Inna ważna kwestia tkwi w zdolności drewna do regeneracji naprężeń, która przebiega szybciej na skutek drgań. Ta właściwość prowadzi do kurczenia się tych części drewna, które wstępnie zostały rozciągnięte, i to również ma wpływ na rozgrywanie się instrumentów. A więc z jednej strony czułość emisji dźwięku na tłumienie wewnętrzne, które zależy od stanu naprężenia w płytach rezonansowych [7], z drugiej zaś strony własności dylatacyjne drewna pod wpływem jego drgań prowadzą do rozgrywania się instrumentów.

Jak zatem określić dobry instrument? Odpowiedź na to pytanie znalazłem w badaniach H. Backhausa ([1], str. 138) prowadzonych przeszło pół wieku temu na czterech instrumentach: (1) cennym i dobrze zachowanym instrumencie Stradivariego, (2) późnoklasycznym instrumencie Storioniego, (3) instrumencie wykonanym ręcznie przez dobrego współczesnego lutnika, wreszcie (4) na słabym instrumencie fabrycznym (rys. 2). Na podstawie tych badań dochodzi on do wniosku, że instrument jest tym lepszy, im lepiej potrafi

wzmacniać harmoniczne w obszarach pomiędzy 3 kHz a 5 kHz [17]. Z drugiej strony wiadomo na podstawie badania emisji strumienia energii wysyłanego przez źródło, że wyższa częstotliwość oznacza wyższą energię. Tak więc H. Backhaus stwierdził, że najlepszy z czterech badanych instrumentów – Stradivarius – miał główny obszar silnych wzmocnień (formant) w najwyższym przedziale częstotliwości (około 4 kHz); to oznacza, że skrzypce Stradivariego miały zdolność wysyłania największych strumieni energii spośród badanych czterech instrumentów. Na uwagę tu zasługuje również fakt, że ów obszar silnych wzmocnień odpowiadał minimum krzywej izofonicznej (równej głośności). Stąd nakładały się dwa efekty: wzmocnienie strumienia energii oraz pozorne wzmocnienie przez ucho ludzkie, najczulsze (patrz krzywe izofoniczne na rys. 3) w pasie częstotliwości, w którym w skrzypcach Stradivariego występował obszar formantowy. Jeżeli zatem uznać instrument Stradivariego za wzorzec, to nasuwa się następujące kryterium dobrego instrumentu. Instrument dobry to taki, który ma zdolność do wzmocnienia wyższych harmonicznych powyżej 3 kHz. Zdolność wzmocnienia wyższych harmonicznych ma istotny wpływ na barwę i nośność dźwięku.



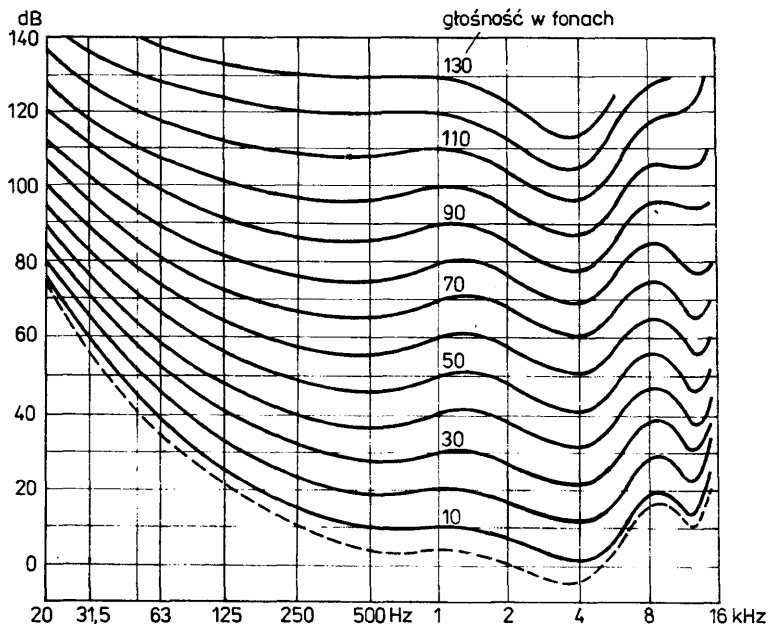
Rys. 2

Rozpoznanie instrumentu i jego ocena powinna zatem być dokonywana na podstawie obrazu widma instrumentu (z tym zastrzeżeniem, że nie można nigdy gwarantować, iż instrument obiektywnie dobry będzie odpowiadał indywidualnemu gustowi określonego muzyka).

Doświadczenia w tym względzie skłaniają do wniosku, iż subiektywna ocena jest bardzo trudna i często bywa błędna, zwłaszcza wtedy, gdy np. są dwa instrumenty i oceniający ma wskazać lepszy. Może się zdarzyć, iż dwaj

muzycy będą mieli odmienne zdania co do wyboru. Wynika stąd, iż trudno byłoby podać definicję dobrego istrumentu, który odpowiadałby wszystkim.

Nośność zapewnia poziom mocy emitowanej przez skrzypce, można więc przyjąć, iż instrument powinien mieć moc na pewnym poziomie. Jeśli zatem poziom mocy wzrasta, to również bogaci się barwa dźwięku dzięki dużej liczbie harmonicznych. Tak więc poziom mocy jest związany z barwą i zwykle piękna barwa łączy się z nośnością. Wniosek stąd, iż czynnikiem podstawowym jest poziom mocy. Poziom ten można mierzyć stosunkowo prostymi metodami. Ponieważ jednak instrumenty o identycznym poziomie mocy mogą mieć różne widmo, więc instrumenty o zadowalającym poziomie mocy powinny być identyfikowane pod względem barwy, która jest kwestią indywidualnych upodobań.

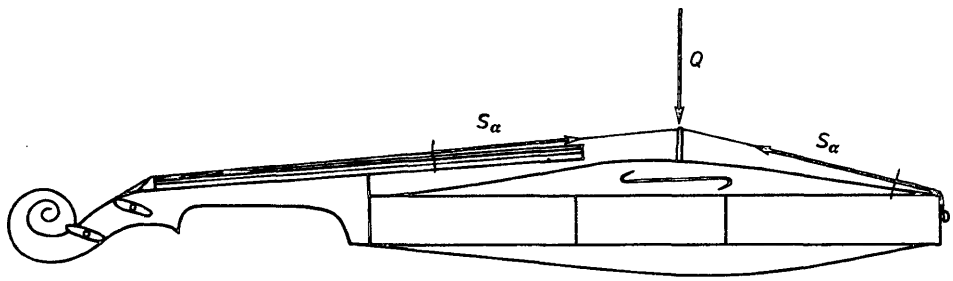


Rys. 3

Gros informacji niesie zatem widmo instrumentu, w którym zawarte są wszystkie istotne cechy pozwalające na jego całkowitą i bezbłędną ocenę.

Przejdziemy teraz do analizy problemu. Na początku rozważmy problem statyki pudła rezonansowego. Pudło rezonansowe (rys. 4) jest obciążone siłami napięcia strun S_α i Q. Są to siły wywołujące ściskanie pudła wzdłuż osi oraz jego zginanie. Efektem tych sił jest to, iż górna płyta instrumentu jest ściskana. Odnosi się to oczywiście do przypadku, gdy całe pudło rezonansowe będzie sklejane bez wstępnych naprężeń. Taki właśnie przypadek odpowiada, w pewnym przybliżeniu, technologii współczesnej. Rzeczywiście technologia współczesna uważa za celowe sklejanie wszystkich części pudła

rezonansowego w stanie ich ścisłego dopasowania, a wieniec boczków jest kształtowany na gorąco. Wyjątkiem od tej ogólnej zasady w opisywanej technologii jest sklejanie belki basowej z płytą górną instrumentu. Praktyka lutnicza każe przy sklejaniu belki basowej dogiąć ją końcami do płyty, co powoduje tendencję do zwiększenia wypukłości tej ostatniej. Zabieg ten jest korzystny dla dźwięku skrzypiec.



Rys. 4

Zapytajmy obecnie, od jakich czynników zależy jakość instrumentów? Instrument pobudzany wykonuje małe drgania i w związku z tym można uważać [11], [12], że jest to układ Clapeyrona. Dla takiego układu [11] można napisać równanie drgań w następującej postaci:

$$(1)\quad q(x,t)+\int_A R^*(x,\xi)\,m(\xi)\frac{\partial^2 q(\xi,t)}{\partial t^2}\,dA(\xi)= -\int_A R^*(x,\xi)\,\alpha(\xi)\frac{\partial q(\xi,t)}{\partial t}\,dA(\xi)+\int_A R^*(x,\xi)\,z(\xi,t)\,dA(\xi),$$

gdzie $q(x,t)$ jest przemieszczeniem, $R^*(x,\xi)$ – funkcją wpływu, $m(\xi)$ – masą przypadającą na jednostkę powierzchni instrumentu, A – obszarem całkowania odpowiadającym powierzchni instrumentu, t – czasem, x, ξ są to wektory położenia punktu na powierzchni instrumentu, $z(\xi,t)$ – siły pobudzające do drgań, a $\alpha(\xi)\,\partial q(\xi,t)/\partial t$ – siły dyssypacyjne.

Rozwiązania równania (1) będziemy poszukiwali w postaci:

$$(2)\qquad q(x,t)=\frac{1}{\sqrt{m(x)}}\sum_{i,j=1}^{\infty}\psi_{ij}(x)\,T_{ij}(t),$$

gdzie $\psi_{ij}(x)$ są funkcjami własnymi operatora całkowego z jądrem

$$R(x,\xi)=R^*(x,\xi)\sqrt{m(x)\,m(\xi)}.$$

Ortogonalność funkcji $\psi_{ij}(x)$ pozwala na rozwinięcie jądra $R(x,\xi)$,

$$R(x,\xi)=\sum_{i,j=1}^{\infty}\frac{1}{k_{ij}^2}\psi_{ij}(x)\,\psi_{ij}(\xi),$$

gdzie k_{ij} są to częstości własne drgań. Przyjmujemy, że całka

$$\int_A \psi_{ij}(\xi)\psi_{pn}(\xi)\frac{\alpha(\xi)}{m(\xi)}dA(\xi)$$

jest równa zero, gdy $(i, j) \neq (p, n)$, a jest równa pewnej liczbie $2h_{ij}$, gdy $p = i$, $n = j$. Po podstawieniu funkcji (2) do równania (1) otrzymamy:

$$\sum_{i,j=1}^{\infty} \psi_{ij}(x)\left[T_{ij}(t)+\frac{1}{k_{ij}^2}(\ddot{T}_{ij}(t)+2h_{ij}\dot{T}_{ij}(t)-a_{ij}(t))\right]=0,$$

co ze względu na ortogonalność funkcji własnych $\psi_{ij}(x)$ daje

$$\ddot{T}_{ij}(t)+2h_{ij}\dot{T}_{ij}(t)+k_{ij}^2 T_{ij}(t) = a_{ij}(t), \tag{3}$$

gdzie

$$a_{ij}(t) = \int_A \psi_{ij}(\xi)\frac{z(\xi, t)}{\sqrt{m(\xi)}}dA(\xi).$$

Wykonując na (3) transformację Fouriera, napiszemy:

$$-\omega^2 \bar{T}_{ij}(\omega)+2h_{ij}i\omega\bar{T}_{ij}(\omega)+k_{ij}^2\bar{T}_{ij}(\omega) = \bar{a}_{ij}(\omega).$$

Po przekształceniu daje to równość

$$\bar{T}_{ij}(\omega) = \bar{G}_{ij}(\omega)\bar{a}_{ij}(\omega),$$

gdzie

$$\bar{G}_{ij}(\omega) = \frac{1}{k_{ij}^2-\omega^2+i2h_{ij}\omega}.$$

Moduł $\bar{G}_{ij}(\omega)$ jest charakterystyką amplitudową i wynosi

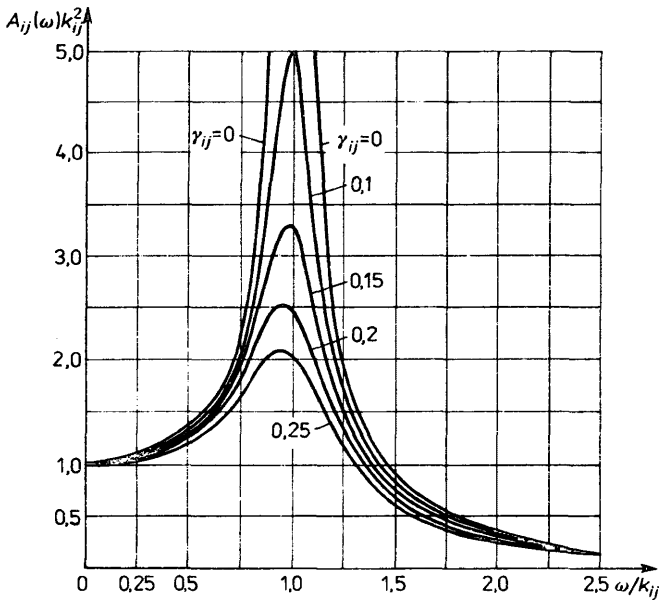
$$|\bar{G}_{ij}(\omega)| = A_{ij}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(k_{ij}^2-\omega^2)^2+4h_{ij}^2\omega^2}}.$$

Właśnie charakterystyki amplitudowe (rys. 5) decydują o rozkładzie formantów w widmie, jak również o poziomie mocy instrumentu.

Do tej kwestii jeszcze wrócimy. Na razie skoncentrujemy się na pudle rezonansowym jako źródle emitowanej energii. Źródłem energii unoszonej przez fale jest energia kinetyczna instrumentu drgającego. W akustyce [5] przy dyskutowaniu problemu emisji strumienia energii rozróżnia się dwa przypadki: pierwszy, gdy długość fali akustycznej jest znacznie mniejsza od rozmiarów instrumentu, i drugi przypadek, gdy jest na odwrót, tzn. gdy długość fali akustycznej jest znacznie większa od rozmiarów instrumentu. W naszych rozważaniach przyjmiemy przypadek pierwszy, dla którego częstości drgań są wysokie. Takie przyjęcie jest bezpieczne i, jak się okaże, wzmocni tezę pracy, gdyż w przypadku przeciwnym, tzn. gdy długość

fali znacznie przewyższa rozmiary instrumentu, strumień mocy jest proporcjonalny do szóstej potęgi częstości przy zadanej wartości amplitudy drgań.

Wracając do przyjętego założenia stwierdzamy, że wówczas można powierzchnię instrumentu podzielić na części tak małe, iż można je uważać za płaskie, lecz z drugiej strony duże w porównaniu z długością fali.



Rys. 5

Można wtedy uważać, że każda taka część wypromieniowuje falę płaską niosącą strumień energii równy $c\mu\langle v^2\rangle$, gdzie v jest składową normalną prędkości powierzchni drgającej instrumentu, c — prędkością rozchodzenia się fali, μ — gęstością ośrodka, a znak $\langle\ \rangle$ oznacza średnią. Prędkość v jest również prędkością czoła fali akustycznej biegnącej od źródła dźwięku, a więc od warstwy przyściennej otaczającej powierzchnię skrzypiec. Całkowity strumień będzie zatem całką po powierzchni instrumentu i wyniesie

$$I = c\mu \int_A \langle v^2\rangle dA. \tag{4}$$

Instrument jest tym lepszy, im większa jest wartość całki strumienia mocy. Pomiar przedstawionej całki jest możliwy, zatem przy konstruowaniu skrzypiec można kierować kolejnymi korektami w ten sposób, ażeby uzyskiwać kolejno większe wartości całki (4).

Z drugiej strony, wiążąc całkę strumienia mocy z gęstością spektralną $S_q(\omega)$ otrzymujemy [12]:

$$I = \beta \int_A \omega^2 S_q(\omega)\, d\omega,$$

gdzie β jest stałą, a gęstość spektralną $S_q(\omega)$ wyraża się wzorem

$$S_q(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} \left[\int_A K_q(x, \tau)\, dA(x) \right] d\tau;$$

$K_q(x, \tau)$ jest tu funkcją korelacyjną procesu $q(x, t)$. Łatwo zauważyć, iż

$$S_q(\omega) = \sum_{i,j=1}^{\infty} [A_{ij}(\omega)]^2 S_{a_{ij}}(\omega),$$

gdzie $S_{a_{ij}}(\omega)$ jest gęstością spektralną procesu $a_{ij}(t)$. Ponieważ gęstość spektralna $S_q(\omega)$ zależy od charakterystyk amplitudowych $A_{ij}(\omega)$, więc łatwo wywnioskować, jakie czynniki wpływają na przesunięcie maksimów ku wyższym częstotliwościom.

Przedstawiony wynik jest istotny, gdyż wskazuje na racjonalną technikę pomiaru. Pobudzając bowiem pudło rezonansowe np. sygnałem typu „białego szumu", wyznaczamy gęstość spektralną $S_q(\omega)$ odpowiedzi instrumentu. Dla każdego instrumentu pobudzanego w tych samych warunkach i takim samym sygnałem, odpowiedź w postaci $S_q(\omega)$ będzie inna, a o wartości instrumentu zadecyduje wartość całki.

$$\int_0^{\infty} S_q(\omega)\, \omega^2\, d\omega. \tag{5}$$

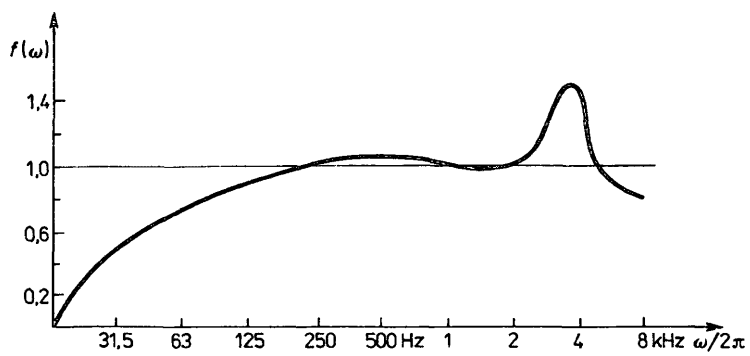
Większe wartości całki powinny odpowiadać lepszym instrumentom.

Przyjęcie całki (5) za kryterium dobroci instrumentu znajduje uzasadnienie w tym, że 1° przesunięcie formantów implikuje wzrost całki (5), 2° całka (5) reaguje nie tylko na przesunięcie formantów, ale również na tworzenie się nowych obszarów silnych wzmocnień, 3° większy wpływ na wzrost całki (5) mają obszary silnych wzmocnień w zakresach wyższych częstości, a samą wartość całki można określić stosunkowo prostymi metodami pomiarowymi. Wystarczy w tym celu pobudzać instrument np. za pomocą generatora „białego szumu" lub sygnałem sinusoidalnym, mierzyć amplitudy $H(\omega)$, a następnie określić np. metodą analogową całkę $\int [H(\omega)]^2 \omega^2\, d\omega$, która odpowiada całce (5). Kryterium całkowe jest łatwe do wykorzystania i może być z powodzeniem wykorzystane w kolejnych korektach instrumentu, czy też przy ustawieniu duszy lub wyborze jej wysokości.

Gdyby uwzględnić fizjologię słuchu, to można by było również ocenić instrument pod względem głośności. Z badań Backhausa [1] wynika, że instrumenty najlepsze były najgłośniejsze. Do oceny głośności należałoby uwzględnić krzywą $f(\omega)$ pozornego wzmocnienia natężenia dźwięku przez ucho ludzkie (rys. 6). Krzywa ta ma swoje maksimum tam, gdzie krzywa izofoniczna ma swoje minimum, i odwrotnie. Instrumentom głośniejszym odpowiadać powinny większe wartości całek

$$I_p = \int_0^{\infty} f(\omega)\, \omega^2\, S_q(\omega)\, d\omega.$$

Górna płyta rezonansowa, jak wiemy, jest bezpośrednio pobudzana do drgań za pośrednictwem podstawka i jest odpowiedzialna w głównej mierze za walory akustyczne pudła rezonansowego. Z tej prostej przyczyny należy skoncentrować głównie uwagę na budowie tej płyty. Rozważając jej drgania zauważymy, że zależą one od trzech czynników: od materiału, lakieru oraz sił. Podstawowym czynnikiem wpływającym na przesunięcie maksimum charakterystyki ku wyższym częstościom jest częstość drgań własnych k_{ij} górnej płyty rezonansowej. Zapytajmy, jak wyznaczyć k_{ij}, aby określić czynniki mające istotny wpływ na zwiększenie częstości własnych poszczególnych form drgań. Dla naszych celów, prowadząc rozważania natury jakościowej, przyjmujemy, że częstości te są równe częstościom drgań cienkościennej, prostokątnej, sprężystej i izotropowej płyty. Modelując w ten sposób górną płytę instrumentu czynimy ją odpowiedzialną za jakość całego instrumentu.



Rys. 6

Równanie różniczkowe opisujące drgania takiej płyty jest następujące [6]:

$$D\Delta\Delta q + S\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \mu\delta\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} = 0, \tag{6}$$

gdzie $D = E\delta^3/12(1-\nu^2)$ to sztywność zginania, E — moduł Younga materiału płyty, δ — grubość płyty, ν — liczba Poissona materiału płyty, q — przemieszczenie, S — siła przypadająca na jednostkę długości, pochodząca od napięcia strun, Δ — operator Laplace'a, μ — gęstość materiału płyty.

Zakładając, że płyta jest prostokątna o bokach a i b oraz że jest zamocowana przegubowo, możemy poszukiwać rozwiązania w postaci:

$$q = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} q_{ij}(t)\sin\frac{i\pi x}{a}\sin\frac{j\pi y}{b}. \tag{7}$$

Podstawiając (7) do równania (6) i wykorzystując ortogonalność funkcji

własnych otrzymamy:

$$\left[D\left(\frac{i^2\pi^2}{a^2}+\frac{j^2\pi^2}{b^2}\right)^2-S\frac{i^2\pi^2}{a^2}\right]q_{ij}(t)+\mu\delta\ddot{q}_{ij}(t)=0.$$

Stąd wynika, że

$$k_{ij}^2=\frac{1}{\mu\delta}\left|D\left(\frac{i^2\pi^2}{a^2}+\frac{j^2\pi^2}{b^2}\right)^2-S\frac{i^2\pi^2}{a^2}\right|.$$

Rozważania teoretyczne prowadzą do następujących wniosków. Górna płyta rezonansowa powinna być wykonana z materiału lekkiego (mały ciężar właściwy) i sprężystego, o możliwie dużym module Younga E. Materiał płyty górnej powinien mieć mały dekrement logarytmiczny drgań (małe tłumienie). Lakier (głównie podkład) powinien nieco zwiększać średni moduł Younga za cenę zwiększenia tłumienia (możliwie małego). Wreszcie siły ściskające górną płytę powinny być wyeliminowane, gdyż obniżają one częstości własne drgań, ograniczając tak ważne dla pięknej barwy instrumentu bogactwo harmonicznych; powodują one również zwiększone tłumienia [7].

Postulat dotyczący sił jest najistotniejszy. Jest to zrozumiałe także intuicyjnie, chodzi tu bowiem o „strojenie" pudła rezonansowego na odpowiednią moc, a co za tym idzie na odpowiednią nośność oraz barwę za pośrednictwem sił działających na górną płytę. Zmiany bowiem tych sił wpływają na zmianę widma instrumentu (na zmianę gęstości spektralnej $S_q(\omega)$), co ma istotny wpływ na całkę (5).

Widać, że przesunięcie formantów w widmie w kierunku wyższych częstości jest korzystne. Postulat przesunięcia formantów w widmie wynika więc ze zmiany częstości własnych poszczególnych form drgań górnej płyty, a zwiększenie tych częstości jest korzystne dla podniesienia poziomu mocy. Analiza matematyczna tego zagadnienia wskazuje tu na dwa istotne fakty:

(1) na przesunięcie formantów związane ze zwiększeniem częstości własnych poszczególnych form drgań,

(2) na pojawienie się nowych formantów („odblokowanych") ze względu na przekroczenie częstości własnej (wartości progowej) zależnej od sił dyssypacyjnych ($k_{ij} > \sqrt{2}\,h_{ij}$).

Pojawienie się nowych formantów wskazuje na możliwości znacznej modyfikacji widma instrumentu nawet przy nieznacznych zmianach sił wewnętrznych prowadzących do odciążenia górnej płyty.

Chcąc otrzymać dobry instrument, należy tak konstruować skrzypce, ażeby po ich montażu płyta górna była rozciągana przez boczki i płytę dolną tak jak skóra na bębnie. Dzięki takiej technologii można stosować płyty górne o grubościach mniejszych od 3 mm, bez niebezpieczeństwa ich deformacji w jej środkowej części. Przypomnijmy, że skrzypce Stradivariego, zwłaszcza te z okresu świetności (po roku 1700), miały górną płytę zwykle

cienką, bliską 2,5 mm grubości. Instrument taki, wykonany zwykłą metodą współczesną, nie będzie dobry, a siły ściskające płytę górną wywołają jej deformację. Aby taki instrument odpowiednio grał, należy tak prowadzić proces jego montażu, aby zamknąć w pudle rezonansowym siły rozciągające górną płytę.

Przejdziemy obecnie do omówienia czułości położenia formantów i emisji dźwięku, ze względu na zmiany tłumienia wewnętrznego oraz sił działających na płytę wierzchnią instrumentu. Zauważmy, że gęstość spektralna zależy od sum kwadratów charakterystyk amplitudowych poszczególnych postaci drgań. Wynika to z faktu, iż drgania płyt instrumentu opisane są funkcjami ortogonalnymi. Ponieważ na widmo składa się suma kwadratów charakterystyk amplitudowych, a więc składników dodatnich, przeto analizując jeden z nich można przewidzieć zarówno zachowanie się formantów, jak również ich rozmieszczenie tak istotne dla nośności, barwy i emisji dźwięku.

Charakterystyka amplitudowa ma swoje maksimum w punkcie

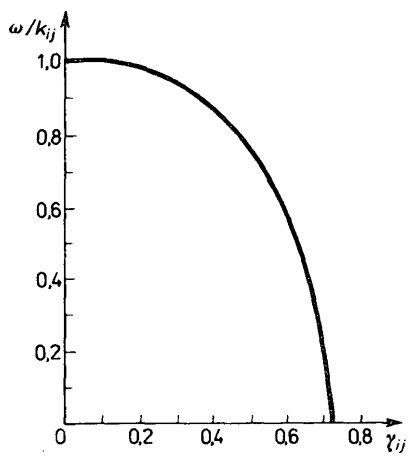
$$\omega = \sqrt{k_{ij}^2 - 2h_{ij}^2}.$$

Należy więc dążyć do uzyskania możliwie dużego k_{ij} oraz małego h_{ij} tak, aby zminimalizować stosunek

$$\gamma_{ij} = h_{ij}/k_{ij}.$$

Jeżeli ustalimy k_{ij}, a jedynie będziemy zmieniali tłumienie h_{ij}, to położenie maksimum charakterystyki amplitudowej $A_{ij}(\omega)$ określi wzór

$$\omega = k_{ij}\sqrt{1 - 2\gamma_{ij}^2}.$$



Rys. 7

Zależność $\omega = \omega(\gamma_{ij})$ opisuje łuk elipsy (rys. 7), który przy wartości γ_{ij} bliskiej $\sqrt{2}/2$ jest bardzo stromy, co wynika z czułości położenia formantu na tłumienie w pobliżu tego punktu. Dlatego też małym zmianom tłumienia

mogą towarzyszyć duże zmiany widma instrumentu, co wynika z faktu wrażliwości położenia formantu względem tłumienia. Z tego właśnie powodu instrumenty, w których występuje ta wrażliwość, mogą przy niewielkiej zmianie czynnika tłumiącego zamilknąć lub rozbrzmieć w zależności od tego, czy tłumienie nieznacznie wzrosło czy zmalało. Lakier z reguły wprowadza większe tłumienie. Instrument wykonany metodą tradycyjną może po nałożeniu lakieru tak pogorszyć swoje własności akustyczne, że uznamy go za bezwartościowy. Zdjęcie zaś lakieru może spowodować z kolei jego znaczne polepszenie. Jest to zjawisko opisanej wrażliwości położenia formantów na tłumienie i dotyczy jedynie instrumentów słabych. Być może stąd wzięło się błędne — w świetle przedstawionej przeze mnie hipotezy — mniemanie o roli lakieru i tylu lutników bezskutecznie poszukiwało tajemniczej recepty lakieru stosowanego przez Stradivariego.

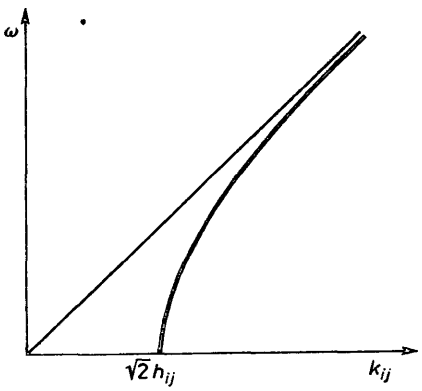
Oczywiście lakier jest istotny, ale bez przesady. Jego rola sprowadza się do kosmetyku, który dodaje uroku pięknej kobiecie, ale sam kosmetyk nie może przywrócić blasku straconemu pięknu. Podobnie jest z instrumentem, który został źle wykonany lub w którym pod wpływem czasu wprowadzone naprężenia uległy relaksacji, zmieniając rozkład sił w pudle rezonansowym. Takiemu instrumentowi nie pomoże żaden wyszukany lakier; należy go przekonstruować tak, jak to wielokrotnie czyniłem przy pomocy lutników. Wszystkie tego rodzaju próby powiodły się i zupełnie bezwartościowe instrumenty ożywały.

Inaczej rzecz ma się w instrumentach o dużych wartościach k_{ij}, a więc małych, bliskich zera γ_{ij}. Dla takich instrumentów, z uwagi na to, że odcinek elipsy jest tu prawie równoległy (por. rys. 7) do osi odciętych, zauważamy małą wrażliwość położenia formantów na tłumienie. Takiemu instrumentowi nie „zaszkodzi" zły lakier. W naszych doświadczeniach nawet lakier „nitro" nie był w stanie „popsuć" instrumentu. Tak więc i to rozumowanie prowadzi do wniosku o dominującej roli naprężeń górnej płyty dla zapewnienia doskonałości instrumentu.

Wiemy już, w jaki sposób instrument reaguje na zmiany tłumienia. Obecnie przeanalizujemy wpływ sił działających na górną płytę na położenie formantu. Problem ten był poruszony już wcześniej. Wiemy, że ściskanie górnej płyty powoduje „wygaszenie" i przesuwanie formantów ku niższym częstościom, zaś rozciąganie jej „odblokowuje" formanty oraz przesuwa je w kierunku wyższych częstości. Ustalając obecnie tłumienie h_{ij} otrzymujemy związek między częstością drgań własnych a położeniem formantu. Obraz graficzny tego związku jest hiperbolą równoosiową (rys. 8). Interesujemy się tylko dodatnią gałęzią tej hiperboli. Widać, że formant pojawiający się na początku układu współrzędnych jest bardzo wrażliwy na zmiany sił w górnej płycie instrumentu. Tak więc regeneracja naprężeń towarzysząca rozgrywaniu się instrumentów powoduje polepszenie się walorów akustycznych pudła rezonansowego.

Emisja dźwięku zależy od maksimów kwadratów charakterystyk amplitudowych składających się na widmo instrumentu. Maksimum to wynosi

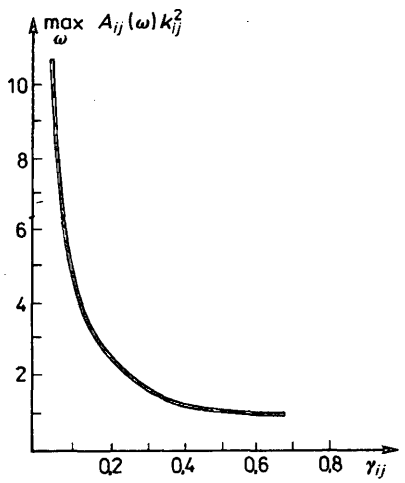
$$\max_{\omega} A_{ij}(\omega) = \frac{1}{2h_{ij}\sqrt{k_{ij}^2 - h_{ij}^2}}.$$



Rys. 8

Ustalając częstości drgań własnych k_{ij} otrzymujemy zależność $\max_{\omega} A_{ij}(\omega)$ od tłumienia. Rys. 9 ilustruje tę zależność.

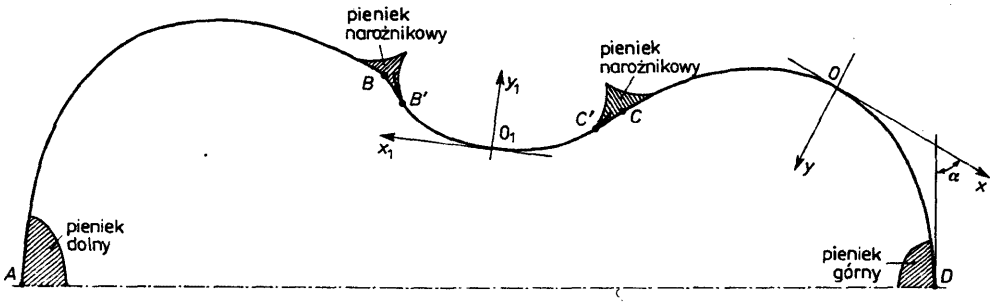
Przejdziemy obecnie do innych spostrzeżeń, które potwierdzają teorię. Zacznijmy od problemu kształtu skrzypiec. Ósemkowaty kształt skrzypiec wynika ze sposobu kształtowania boczków. W technologii tradycyjnej odkształca się je na gorąco. Zapominając o tym sposobie formowania boczków, odkształćmy je sprężyście. Uzyskany wynik jest interesujący, gdyż poszcze-



Rys. 9

gólne łuki są, jak łatwo sprawdzić eksperymentalnie, tzw. elastykami Eulera [2] (rys. 10) drugiego typu ($\alpha < 90°$). Są to krzywe uzyskane w wyniku odkształceń sprężystego pręta smukłego siłami ponadkrytycznymi.

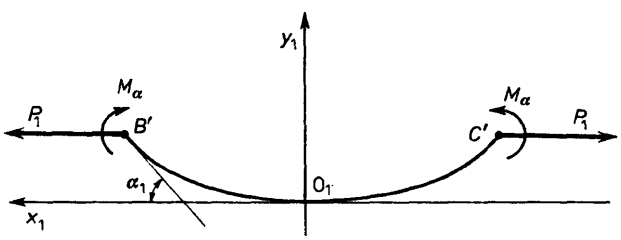
Na rys. 10 przedstawiono metodę otrzymania poszczególnych łuków zarysu boczków przez ich gięcie sprężyste. O ile łuk AB jest podobny do łuku CD, o tyle łuk BC – jeżeli ma odpowiadać w kształcie boczkom



Rys. 10

większości instrumentów klasycznych – powinien być obciążony na końcu momentem gnącym M (rys. 11) przy jednoczesnym działaniu sił P. Od strony matematycznej wyznaczenie łuków AB i CD sprowadza się do całkowania równania różniczkowego nieliniowego postaci [2]

$$\frac{d^2\varphi}{ds^2} = -\frac{P}{EJ}\sin\varphi,$$



Rys. 11

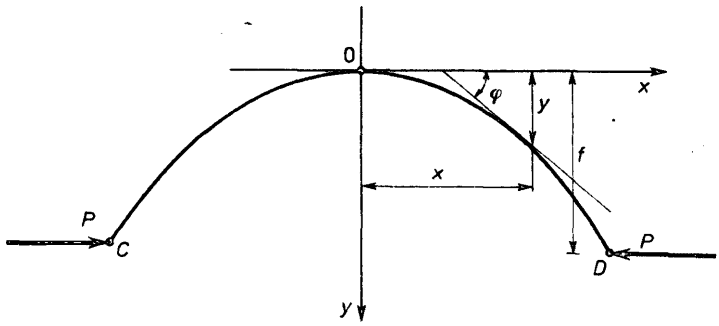
gdzie φ jest kątem obrotu osi pręta w wyniku jego odkształcenia, s – długością łuku, EJ – sztywnością zginania (rys. 12). Całkę pierwszą tego równania znajdujemy w postaci:

$$\tfrac{1}{2}\left(\frac{d\varphi}{ds}\right)^2 = \frac{P}{EJ}(\cos\varphi - \cos\alpha),$$

gdzie α jest kątem obrotu osi pręta w punkcie przyłożenia siły P. Zauważmy, że $dx = ds\cos\varphi$ oraz $dy = ds\sin\varphi$, zatem wyznaczając ds otrzymujemy (po całkowaniu) wyrażenia na x oraz y:

$$x = \tfrac{1}{2}\sqrt{\frac{EJ}{P}}\int_0^{\varphi}\frac{\cos\varphi\, d\varphi}{\sqrt{\sin^2\tfrac{1}{2}\alpha - \sin^2\tfrac{1}{2}\varphi}},$$

$$y = \tfrac{1}{2}\sqrt{\frac{EJ}{P}}\int_0^{\varphi}\frac{\sin\varphi\, d\varphi}{\sqrt{\sin^2\tfrac{1}{2}\alpha - \sin^2\tfrac{1}{2}\varphi}}.$$



Rys. 12

W skrzypcach Stradivariego można spotkać $\alpha \approx 60°$ (tablica I).

Tablica I. $\alpha = 60°$

φ	x	y	φ	x	y
1	0.01745	0.00015	33	0.57794	0.17699
3	0.05235	0.00137	36	0.63154	0.21384
6	0.10472	0.00549	39	0.68579	0.25549
9	0.15708	0.01238	42	0.74098	0.30265
12	0.20944	0.02209	45	0.79758	0.35640
15	0.26183	0.03467	48	0.85635	0.41838
18	0.31424	0.05020	50	0.89735	0.46557
21	0.36669	0.06878	53	0.96331	0.54858
24	0.41923	0.09055	56	1.03907	0.65485
27	0.47190	0.11568	59	1.13972	0.81243
30	0.52477	0.14440	60	1.18807	0.89314

Wyznaczenie łuku BC wymaga rozwiązania równania

$$\frac{d^2\varphi}{ds^2} = \frac{P}{EJ}\sin\varphi.$$

Prowadzi to do całki pierwszej

$$\tfrac{1}{2}\left(\frac{d\varphi}{ds}\right)^2 = \tfrac{1}{2}\left(\frac{M_\alpha}{EJ}\right)^2 + \frac{P}{EJ}(\cos\alpha_1 - \cos\varphi).$$

M_α/EJ jest krzywizną $1/\varrho_\alpha$ w punkcie przyłożenia momentu skupionego M_α (na końce pręta). Przyjmując, że krzywizna w środku wynosi $1/\varrho_0$, otrzymujemy wyrażenia na x_1 oraz y_1 w postaci:

$$x_1 = \varrho_\alpha \int_0^\varphi \frac{\cos\varphi\, d\varphi}{\sqrt{\left(\frac{\varrho_\alpha}{\varrho_0}\right)^2 + \frac{\sin^2\frac{1}{2}\varphi}{\sin^2\frac{1}{2}\alpha_1}\left(1 - \left(\frac{\varrho_\alpha}{\varrho_0}\right)^2\right)}},$$

$$y_1 = \varrho_\alpha \int_0^{\varphi} \frac{\sin\varphi \, d\varphi}{\sqrt{\left(\frac{\varrho_\alpha}{\varrho_0}\right)^2 + \frac{\sin^2 \frac{1}{2}\varphi}{\sin^2 \frac{1}{2}\alpha_1}\left(1 - \left(\frac{\varrho_\alpha}{\varrho_0}\right)^2\right)}}.$$

W skrzypcach Stradivariego można spotkać $\alpha_1 \approx 37°$, a $\frac{\varrho_\alpha}{\varrho_0} \approx \frac{1}{3}$ (tablica II).

Tablica II. $\alpha_1 = 37°$

φ	x_1	y_1	φ	x_1	y_1
1	0.05230	0.00045	21	0.83760	0.13706
3	0.15561	0.00405	23	0.88683	0.15694
5	0.25529	0.01101	25	0.93228	0.17716
7	0.34963	0.02091	27	0.97430	0.19765
9	0.43768	0.03327	29	1.01320	0.21833
11	0.51913	0.04761	31	1.04928	0.23915
13	0.59409	0.06352	33	1.08275	0.26007
15	0.66292	0.08067	35	1.11384	0.28105
17	0.72612	0.09878	37	1.14274	0.30206
19	0.78418	0.11763			

Należy zwrócić uwagę jeszcze i na to, że przez takie sprężyste odkształcenie boczków uzyskujemy napięcia siłami rozciągającymi tzw. „policzki", co jest istotne. „Policzki" dolne będą słabiej rozciągane przez boczki od „policzków" górnych, przy tej samej sztywności zginania boczków. Stąd też, w razie potrzeby renowacji, wystarczy zwiększyć napięcie boczków w okolicach guzika, np. przez odklejenie dolnego pieńka skrajnego wraz z częścią boczków w jego okolicy i przesunięcie go nieznacznie w głąb pudła rezonansowego i ponowne sklejenie, dla wyrównania wewnętrznych sił rozciągających górną płytę. To wspomniane wyrównanie sił rozciągających można uzyskać również na wiele innych sposobów (mechanicznych lub fizyczno-chemicznych).

Przy okazji warto zauważyć, że Stradivari prawdopodobnie jedynie wstępnie formował na formie wieniec boczków, a następnie po ewentualnym przyklejeniu listewek regulował napięcia. Jest bowiem wątpliwe, by Stradivari, którego każdy model miał nieco inne wymiary, mógł za każdym razem wykonywać nową formę.

Drewno, jak to niektórzy określają, przystosowuje się i wydawałoby się, że po pewnym czasie siły w wieńcu znikną. Doświadczenia pokazują jednak, że jakkolwiek procesy relaksacyjne przebiegające w czasie zmniejszają wartość siły osiowej rozciągającej pudło rezonansowe wzdłuż osi, to jednak nie sprowadzają jej do zera. Jest istotne, ażeby naprężenia rezidualne były jak największe. Naprężenia te trwają i, co ważniejsze, mają zdolności regeneracyjne. To spostrzeżenie nasuwa przypuszczenie, że w zamysłach klasyków

lutników było wprowadzenie sił rozciągających płyty rezonansowe skrzypiec i innych instrumentów strunowych przez boczki. Zauważmy, że ósemkowaty kształt skrzypiec potwierdza wnioski płynące z rozważań teoretycznych.

Następna sprawa – to płyty rezonansowe. Płyta wierzchnia wykonana z drewna świerkowego lub jodłowego jest znacznie cieńsza od płyty dolnej wykonanej przeważnie z drewna jaworowego. W technice lutniczej płyta wierzchnia zwykle składa się z dwóch części, sklejonych wzdłuż jej osi. Płyta dolna bywa wykonywana również z dwóch klinów. Jest sprawą godną uwagi, iż kliny, z których rzeźbi się płyty rezonansowe, są sklejane w ten sposób, że włókna tuż pod korą stanowią środek płyt. Otóż te właśnie włókna (zewnętrzne) w czasie wzrostu drzewa doznawały dużych obciążeń siłami rozciągającymi, gdyż jak wiadomo naprężenia wzrostowe kształtują się tak, iż rdzeń pnia drzewa jest silnie ściskany przy równoczesnym rozciąganiu włókien zewnętrznych [4].

Takie ułożenie włókien predysponuje środkową część płyt do przenoszenia rozciągania. Biorąc pod uwagę z jednej strony praktykę mistrzów szesnastowiecznych, a z drugiej zjawisko regeneracji naprężeń można dojść do wniosku, iż chodziło o to, ażeby płyta (zwłaszcza wierzchnia) była rozciągana. Własność drewna polegająca na zdolności regeneracji naprężeń wydaje się jednym z podstawowych czynników pozwalających na utrzymanie naprężeń rezidualnych przez długie lata, a te gwarantują dobre własności akustyczne płyt rezonansowych.

Praktykowany przez niektórych lutników sposób sklejania klinów przez poprzeczne ściskanie ściskiem w połowie ich wysokości wymaga wykonania szczeliny pomiędzy klinami tak, ażeby ściśnięcie spowodowało zgięcie klinów. Takie zgięcie wyzwala również naprężenia rozciągające środkową część płyty.

Przejdziemy obecnie do problemu grubości płyt. W skrzypcach sławnych mistrzów spotykamy zazwyczaj dość cienką płytę górną (2,5 mm), natomiast współczesna technika lutnicza przewiduje powyżej 3 mm. Okazuje się bowiem, że zbyt cienka płyta górna, przy stosowaniu zwykłej technologii, doznaje deformacji w swej środkowej części. Jest tak dlatego (o czym już była mowa), że współczesna technologia wykonywania skrzypiec prowadzi do obciążenia siłami ściskającymi górną płytę. Siły te – to wynik napięcia strun. Z drugiej strony, płyty dolne są zwykle grubsze, dochodzą w centrum do 5 mm grubości. Tu potwierdza się to, iż budowniczowie szesnastowieczni dążyli do odciążenia górnej płyty, gdyż jej funkcja sprowadza się do funkcji membrany, podobnej do skóry na bębnie. Stąd – niezależnie od rozważań czysto teoretycznych – możemy wyciągnąć wniosek, iż górna płyta powinna być rozciągana, a nie ściskana.

W tym miejscu możemy wysnuć przypuszczenie co do „śmierci instrumentu". Na czym ona polega? Pudło rezonansowe jest stale pod wpływem naciągu strun. Siły w strunach powodują zginanie i ściskanie pudła wzdłuż osi. Jeśli zatem nasze przypuszczenie, że płyta górna, jak skóra na bębnie, powinna być naciągnięta (a nie ściskana naciągiem strun), to przy montażu

należy nie tylko sprężyście odkształcić wieniec boczków, ale również płytę dolną odkształcić tak, by rozciągała ona poprzez pieńki płytę górną. Jest to możliwe, jak to już wspomniano, gdyż układ pudła rezonansowego jest wewnętrznie hiperstatyczny.

Jeżeli zatem wykonamy płytę dolną w postaci łuku wygiętego w stronę przeciwną do tendencji wyginania jej naciągiem strun, to wówczas należy ją dogiąć w celu przyklejenia jej do wieńca boczków (zgięcie płyty zwiększa jej częstości drgań [16], jak również może zmniejszyć korzystnie dekrement logarytmiczny dla wyższych form drgań [7]). Właśnie ten zabieg spowoduje „chęć" cofnięcia się odkształconej sprężyście płyty dolnej. Następstwem tego będzie efekt przesunięcia punktu równowagi wewnętrznej pudła przez przejęcie obciążenia od strun przez dolną płytę oraz wieniec boczków. Stan tej równowagi, na skutek zjawisk reologicznych w drewnie, będzie zakłócony w ten sposób, iż napięte struny będą uparcie dążyły do odwrócenia sytuacji, tzn. do takiego stanu równowagi, w którym górna płyta przejmie obciążenie od strun, a więc staje się niejako „filarem". To uparte dążenie do takiego niekorzystnego stanu trwa przez cały okres istnienia instrumentu smyczkowego. Gdy górna płyta przejmie obciążenia od strun, następuje „śmierć instrumentu". Naturalnie, znając powody tej „śmierci" można łatwo instrument „reanimować".

Reasumując stwierdzamy, że tak cienkie płyty mogły być stosowane przez klasyków lutnictwa dzięki temu, że ich technologia była odmienna od technologii współczesnej i zapewniała odciążenie płyty górnej od sił pochodzących od naciągu strun.

Dalszym faktem potwierdzającym tę hipotezę jest problem belki basowej. Lutnicy od dawna stosują zabieg wymiany belki, co polepsza walory akustyczne pudła rezonansowego. Z rozważań nad statyką pudła rezonansowego wynika, że taka wymiana prowadzi w końcu do wyzwolenia się sił rozciągających górną płytę. Należy przypomnieć, że belkę basową wkleja się z naprężeniami przez dogięcie jej końców do płyty wierzchniej. A więc zabieg wymiany belki basowej stosowany od dawna przez lutników potwierdził oczekiwania, gdyż jest zgodny z hipotezą naprężeniową tajemnicy dobrego instrumentu.

Skoro jesteśmy przy belce basowej, to pozwolę sobie uczynić jeszcze jedną uwagę. Niewątpliwie jeśli belka basowa ma większą sztywność, to końcowy efekt wyzwalający siły rozciągające górną płytę będzie większy, przy niezmienionym jej odkształceniu. Stąd tendencja do powiększania belki basowej w stosunku do tej, którą stosował Stradivari. Nasuwa się pytanie: czy ta tendencja jest słuszna? Niewątpliwie życie zmusiło lutników do tej zmiany. Wobec stosowanej przez nich technologii starowłoska cienka belka basowa jest anachronizmem. Zapytajmy, jak ta rzecz ma się obecnie, w świetle nowej hipotezy naprężeniowej. Otóż sądzę, że powrót do belek o mniejszych wymiarach jest kwestią czasu. Dlaczego? Odpowiedź jest prosta. Wystarczy zwrócić uwagę na trzy fakty:

(1) W nowej technologii opartej na powyżej przedstawionych równaniach nie belka basowa gra rolę zasadniczego nośnika sił rozciągających, a inne elementy pudła rezonansowego, jak boczki i płyta dolna.

(2) Duży przekrój belki basowej powoduje asymetrię w rozkładzie sił działających na górną płytę, w wyniku czego pojawia się zginanie ukośne pudła rezonansowego.

(3) Zbyt duża masa belki basowej obniża częstości własne górnej płyty, co pogarsza własności akustyczne skrzypiec.

Reasumując można stwierdzić, iż w świetle nowej technologii budowy skrzypiec powrót do starowłoskiej belki basowej jest celowy.

Nowa technologia zakłada zakumulowanie w pudle rezonansowym maksimum energii układu i to pozwala oczekiwać długiej żywotności instrumentu. Jest tak dlatego, ponieważ pudło rezonansowe jest wstępnie sprężone. Warto zauważyć również, że pożądane stany naprężeń można uzyskiwać nie tylko drogą odkształceń mechanicznych, ale również metodami fizyczno-chemicznymi. Drewno zwilżone pęcznieje, a schnąc kurczy się. Tak więc przyklejając płyty instrumentów w stanie całkowitego lub częściowego zwilżenia można uzyskać pożądane stany naprężeń. Jest bardzo prawdopodobne, iż właśnie na tej drodze uzyskiwali swoje efekty mistrzowie starowłoscy, gdyż analiza drewna tych instrumenów wykazała ślady popiołu, a więc związków alkalicznych. Wiemy z nauki o drewnie, że związki zasadowe potęgują zjawisko pęcznienia drewna.

Poglądy na temat doboru materiału, lakierów, jak również grubości poszczególnych płyt mogą w świetle prezentowanej hipotezy ulec zmianie. W nowej technologii zasadniczym celem jest przesunięcie punktu równowagi wewnętrznej pudła rezonansowego w celu uzyskania silnych wzmocnień w pasach wyższych częstotliwości, co powoduje zmiany emisji i barwy dźwięku.

I jeszcze parę słów na temat strony praktycznej zagadnienia. W 1979 roku były wykonane pierwsze egzemplarze skrzypiec z uwzględnieniem koncepcji naprężeniowej. Wykonał je młody lutnik Krzysztof Mróz, wówczas pracownik Dolnośląskiej Fabryki Instrumentów Lutniczych w Lubinie, a dziś posiadający swoją prywatną pracownię we Wrocławiu.

W sprawach pomiarów współpracowałem od 1979 r. najpierw z drem hab. inż. Wojciechem Cholewą, a następnie z drem inż. Janem Chojcanem, pracownikami Politechniki Śląskiej. W trakcie naszej współpracy zrodziło się wiele pomysłów dotyczących różnych wariantów badań i kryteriów oceny jakości skrzypiec. W 1980 roku nawiązałem kontakt ze Spółdzielnią „Ton" w Warszawie, gdzie wprowadziłem lutników w nową technologię renowacji skrzypiec. Jednym z nich był Jerzy Dłutowski, uzdolniony lutnik, który osiągnął na tym polu znaczne wyniki.

Równolegle wprowadziłem w tę nową technologię Stefana Węgrzyna, lutnika Akademii Muzycznej w Katowicach. Stał się on również wyznawcą tej „nowej wiary". W 1981 roku nawiązałem kontakt z Zygmuntem Kowalskim,

profesorem AGH w Krakowie, chemikiem, hobbystą w dziedzinie skrzypiec. Przekazałem mu informacje na temat koncepcji naprężeniowej nowej technologii, jak i metod pomiarowych. Z wielką satysfakcją obserwowałem, jak według moich wskazówek doskonali swój warsztat pracy i ile wnosi własnej inicjatywy do mojej zasadniczej koncepcji. On również wykonał wiele eksperymentów, potwierdzając moją koncepcję naprężeniową przynajmniej do 1983 r., kiedy nagle, z niezrozumiałych dla mnie powodów, zerwał ze mną wszelkie kontakty. Podobno prof. Kowalski współpracuje z firmą Polonijno-Zagraniczną „Mega" w Katowicach, która produkuje instrumenty lutnicze i ich części.

W roku 1983 nawiązałem kontakt, już drugi raz, z Dolnośląską Fabryką Instrumentów Lutniczych w Lubinie. Przygotowałem dla tej fabryki technologię, która po wykonaniu egzemplarzy prototypowych dała pomyślne rezultaty. Brzmienie tych instrumentów okazało się bardzo dobre, co wywołało pewną konsternację. W fabryce nie wierzono w moją koncepcję. Wówczas Fabryka poprosiła mnie o opinie Stowarzyszenia Polskich Artystów Lutników. Lutnicy co do brzmienia nie zabierali głosu, natomiast przepowiedzieli deformowanie się górnych płyt skrzypiec wykonanych na podstawie mojej technologii (proponowałem je cienkie, 2,5 mm grubości) i fabryka odstąpiła od zamiaru produkcji skrzypiec. Trochę szkoda, że tak łatwo odstępuje się od słusznych rozwiązań, ogłaszając *désintéressement*. Tymczasem odkupiłem te prototypowe instrumenty od fabryki i po kilku latach stwierdzam brak jakichkolwiek deformacji górnej płyty. Walory akustyczne tych instrumentów pozostały bez zmiany, a nawet może się polepszyły. Szkoda, że takie skrzypce nie są masowo produkowane w naszym kraju, mogłyby zaspokajać potrzeby młodzieży muzykującej.

Teorię prezentowałem już wielokrotnie, głównie zainteresowali się nią matematycy i mechanicy. W roku 1983 na Kongresie Matematyków, po moim referacie przedstawiającym nową koncepcję widzenia problemu skrzypiec, który spotkał się z bardzo dużym zainteresowaniem, Aureli Błaszczok, młody utalentowany skrzypek, prezentował dwa instrumenty wykonane według mojej koncepcji. Jednym z nich był instrument wykonany w fabryce w Lubinie, zresztą parę miesięcy później na tym właśnie instrumencie Aureli Błaszczok grał w Gliwicach na swoim recitalu.

Zainteresowanie tym niekonwencjonalnym spojrzeniem na problem skrzypiec wciąż wzrasta. Oczywiście, są również i tacy, którzy odrzucają tę ideę bezkrytycznie na skutek niedostatecznej wiedzy.

Jeszcze na zakończenie kilka słów na temat niedawno opublikowanego artykułu Carleen Hutchins [3]. Hutchins zajmuje się problemem badania figur Chlandiego na wyizolowanych płytach rezonansowych instrumentu w celu zapewnienia jego wysokiej jakości. Jak wynika z tego artykułu, dość żmudne badania nie spełniają pokładanych nadziei, pomimo uzyskania pożądanych przebiegów linii węzłowych. Jest to jeszcze jeden argument przema-

wiający za tym, że chcąc odpowiedzieć w sposób pełny na pytanie, na czym polega istota dobrego instrumentu, nie można pominąć kwestii wpływu stanów naprężenia w płytach rezonansowych na jakość instrumentu.

Przemyślenia zawarte w niniejszej pracy mają zarówno część formalno-logiczną, jak i intuicyjną. Warto zwrócić uwagę na dwa aspekty: po pierwsze, subtelność problemu budzącego do dnia dzisiejszego szereg dyskusji i, po drugie, niesprzeczność poszczególnych jego wątków tak dobrze stanowiących zwartą całość. Przedstawiona hipoteza wydaje się problemem kluczowym dla instrumentów strunowych; jest ona jednocześnie punktem wyjścia do dalszych badań.

Metody matematyczne pozwalają w sposób prosty i przejrzysty rzucić światło na naturę zagadnień występujących pod hasłem „tajemnica lutników starowłoskich". Tezę, że „matematyka pozwala doskonalić skrzypce", możemy zatem uznać za słuszną.

Literatura

[1] S. Golachowski, M. Drobner, *Akustyka muzyczna*, PWN, Kraków 1953.
[2] M. T. Huber, *Teoria sprężystości*, część II, PWN, Warszawa 1954.
[3] C. M. Hutchins, *The Acoustics of Violin Plates*, Scientific American, October 1981, vol. 245, Number 4.
[4] F. Krzysik, *Nauka o drewnie*, PWN, Warszawa 1978.
[5] L. Landau, E. Lifszic, *Mechanika ośrodków ciągłych*, PWN, Warszawa 1953.
[6] W. Nowacki, *Dynamika budowli*, Arkady, Warszawa 1961.
[7] G. S. Pisarenko, A. P. Jakowlew, N. M. Matwiejew, *Własności tłumienia drgań materiałów*, WNT, Warszawa 1976.
[8] B. Skalmierski, *Drgania pudła rezonansowego skrzypiec*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1978, seria: Górnictwo z. 89, Nr 576, 237–242.
[9] –, *The Statics and Dynamics of the Sound Box of Stringed Instruments*, Bull. Acad. Polon. Sci. série techn. 29 (1981), 169–173.
[10] –, *The Construction of Old Italian Violins: A Tentative Explanation*, ibidem 29 (1981), 175–181.
[11] –, *Mechanika*, PWN, Warszawa 1977.
[12] –, *Mechanics and Strength of Materials*, Studies in Applied Mechanics 1, Elsevier Amsterdam–Oxford–New York, PWN, Warszawa 1979.
[13] –, *Gdzie tkwi tajemnica dobrego instrumentu*, Przegląd Techniczny 37 (1979).
[14] –, *Tajemnica dobrego instrumentu*, ibidem 1 (1980).
[15] –, *Sound Emission Intensity and the Quality of an Instrument*, Bull. Acad. Polon. Sci. Série techn. 32 (1984), 615–622.
[16] –, *Wpływ naprężeń wstępnych na drgania układów sprężystych*, Zeszyty Naukowe WSI, Opole, nr 109, seria: Konferencje, Matematyka z. 9, Metody Matematyczne w Technice, tom II, 453–462.
[17] F. Trendelenburg, *Akustik*, Berlin, J. Springer, 1939.