

4. *Попова Н.М.* Гигиенические требования к организации учебных занятий / Н.М. Попова, Г.М. Сапожникова // Школа и психическое здоровье учащихся. – М.: Медицина, 1988. – С. 54-78.
5. *Розенблат В.В.* Утомление / В.В. Розенблат, Е.Ф. Полежаев, Р.В. Тонкова-Ямпольская // БМЭ. – М., 1985. – Т.26. – С. 401-407.
6. *Антропова М.В.* Работоспособность учащихся и ее динамика в процессе учебной и трудовой деятельности / М.В. Антропова. – М.: Просвещение, 1968. – 251 с.
7. *Ухтомский А.А.* Современное состояние проблемы утомления // Материалы к 5 Всесоюзному съезду физиологов, биохимиков и фармакологов / А.А. Ухтомский. – М., 1934. – С. 6-8.
8. *Верхало Ю.Н.* Установа для исследования работоспособности и учета эффективности производственной гимнастики / Ю.Н. Верхало, А.В. Зиньковский // Теория и практика физической культуры, 1981. – Т. 28. – №4. – С. 36-38.
9. *Анохин П.К.* Философские аспекты теории функциональной системы / П.К. Анохин. – М.: АПН СССР, Наука, 1978. – с.
10. *Павлов И.П.* Последние сообщения по физиологии и патологии высшей нервной деятельности: Сообщение 3-е / И.П. Павлов. – Л.; М.: Изд-во АН СССР, 1935. – 45 с.

Аннотация

В статье рассмотрен вопрос обучения физике учащихся с задержкой психического развития, раскрыты особенности формирования познавательной активности у учащихся с задержкой психического развития на уроках физики.

Ключевые слова: *обучение физике, познавательная активность, учащиеся с задержкой психического развития.*

Annotation

In the article the question of studies of physics of students is considered time-lagged psychical development, the features of forming of cognitive activity are exposed for students time-lagged psychical development on the lessons of physics.

Keywords: *studies of physics, cognitive activity, students time-lagged psychical development.*

УДК 37.013.8 : 784

Сиротюк Т. А.
Національний педагогічний університет
імені М.П. Драгоманова

РОЛЬ ІМПЕДАНСУ У СПІВОЧОМУ ГОЛОСІ

У статті розглядається фізична сутність імпедансу, показана його роль у співочому голосі. Наведені приклади дослідів, що пояснюють імпеданс.

Ключові слова: *імпеданс, співочий голос, голосоутворення.*

Відомо, що спів у великих оперних театрах у супроводі симфонічного оркестру вимагає від виконавців перших партій розвитку величезної інтенсивності звуку, що досягає 100-120 децибел (децибел (дб) – одиниця гучності. 1 дб відповідає ледве вловимому на слух приросту гучності. Весь діапазон гучності і відповідно інтенсивностей звуку практично вкладається в 130-150 дб. Значення 130 дб відповідає больовому порозу). Будь-який педагог, який готує оперних співаків, яким би методом він не користувався, повинен допомогти своєму учневі оволодіти цілком певними

акустичними закономірностями, які без шкоди для голосового апарату дозволяли б розвивати граничну силу звуку.

Досить розглянути аналогію між ротоглотковими порожнинами людини і рупорним гучномовцем, щоб переконатися, що поставлена проблема приймає чіткі акустичні контури. У гучномовці джерелом звуку є мембрана, яка передає свої коливання частинкам повітря, в голосовому апараті – голосова щілина. Надзв'язкова порожнина і звужений вхід у гортань відіграють роль передрупорної камери. Закон механіки Ньютона стверджує: дія дорівнює протидії. Це означає, що якщо ми штовхаємо яке-небудь тіло, наприклад, з силою 100 Н, то до нашої руки також буде прикладено протидію або опір, що дорівнює 100 Н. Коливання мембрани, створюючи тиск на прилеглі шари повітря, викликають з його боку опір. Чим більшим буде цей опір, тим більшу енергію мембрана зможе передати в зовнішній простір, тим більшим буде її «коефіцієнт корисної дії».

Загальний опір (протидія), що створюється ротоглотковим рупором, його формою і різними звуженнями, а також стовпом повітря, що коливається в ньому, називається опором, або імпедансом (термін «імпеданс» походить від латинського слова «*impedire*» – чинити опір; поняття «імпеданс» у специфічному математичному трактуванні широко використовується в акустиці і теоріях голосоутворення).

Поняття «імпеданс» не вичерпує всього фізичного змісту і багатства цього поняття, яке до цих пір було надбанням лише теорії електричних і механічних коливань. Є небезпека, що при спробах обмежитися короткими і спрощеними тлумаченнями поняття «імпеданс» може перетворитися для вокальної педагогіки в непізнану «річ в собі». Це дуже турбувало Юссона, і з цього приводу він писав: «Поняття «імпеданс», ймовірно, буде дуже важким для вокалістів. Для нас, математиків і акустиків, це поняття дуже близькі, але я переконався, що зовні нашого середовища його мало хто розуміє...

Тепер про оцінку самими співаками імпедансу, яким вони навантажують гортань. Вони сприймають його і через активність дихання і через внутрішні відчуття, що виникають в області гортані і в ротоглоткових порожнинах. Вони правильно оцінюють навіть значення імпедансу і при його допомозі регулюють фонацію. Хороші співаки це роблять несвідомо... Я вивчав дію імпедансу протягом трьох років, використовуючи найбільш досконалі методи (стробоскопію, рентгенографію, томографію, метод Фабра), і відкрив, що імпеданс надзвичайно сильно змінює поведінку голосових зв'язок. Далі було неважко показати, що імпеданс є дуже ефективним захисним механізмом нейром'язового функціонування гортані. Коли імпеданс дуже слабкий, надзвичайно збільшується витрата повітря через голосову щілину і гортань реагує на це сильним стисненням. Робота голосових зв'язок значно полегшується, коли приведений імпеданс має достатнє значення. У цих умовах співак може розвивати велику інтенсивність звуку без небезпеки для гортані. Можна сказати, що вміння підтримувати достатній імпеданс є для співака дуже важливим елементом його вокальної майстерності» [3].

Розглянемо послідовно, як на основі простих дослідів може бути сформоване поняття «імпеданс».

Вихідним пунктом наших міркувань будуть три закони Ньютона.

– Всяке тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, якщо тільки воно не вимушене змінювати його під впливом сил, які діють на нього.

– Прискорення руху тіла пропорційне силі і обернено пропорційне до маси тіла:

$$a = \frac{F}{m}, \text{ або сила визначається добутком маси і прискорення: } F = ma.$$

– Дія дорівнює протидії. (Дія може бути названа активною силою, протидія – реактивною силою або реакцією.) Наприклад, якщо рука приводить у рух тіло масою m , то активна сила прикладена до

тіла, а реактивна – до руки. Цю реактивну силу ми сприймаємо як «опір». Повсякденний досвід створює оманливе враження, що тіло малої маси (легке тіло) «вимагає» прикладання малої сили. Насправді, на тіло масою 1 г можна подіяти силою в десятки тисяч ньютон, але при цьому воно набуде величезної швидкості й енергії. Відповідною буде протидія або реакція. (Рукавички у боксі використовуються тому, що «протидія» миттєво пошкодила б руки обох боксерів.)

Проведемо наступний мислений експеримент. Уявимо собі гладку горизонтальну поверхню і на ній відполірований металевий куб масою m . Штовхнемо куб, він набуде швидкості v . Відповідно до закону інерції куб почне рухатися прямолінійно і рівномірно, але через якийсь час почне сповільнювати свій рух і зупиниться. Пояснюється це тим, що на куб діяла гальмівна сила $R_{\text{гальм}}$ створена тертям поверхонь і опором повітря. Назвемо цю силу R_a активним опором. Якщо ми змусимо ковзати куб по горизонтальній поверхні зі сталою швидкістю v , то наша рука відчуватиме опір R_a . Фактично куб рухатиметься за інерцією – він набуває кінетичної енергії $\frac{mv^2}{2}$, і наше зусилля затрачається тільки на

подолання активного опору R_a . Це положення залишається вірним для будь-якого тіла, що рухається прямолінійно і рівномірно, наприклад, автомобіль або літак, – енергія двигуна витрачається тільки на подолання активних опорів.

Але як тільки ми змусимо рухатися куб прискорено, наша рука почне відчувати не тільки активний опір R_a , але ще й додатковий опір, так звану силу інерції. За другим законом Ньютона, вона залежить від значення прискорення і маси і визначається їх добутком. Отже, у цьому випадку сумарний опір, або імпеданс Z , складатиметься з двох доданків – активного опору R_a і сили інерції $m\alpha$, або $Z = R_a + m\alpha$.

У даному прикладі гладкої відполірованої поверхні R_a є дуже маленькою величиною, тоді як сила інерції $R_r = m\alpha$ може, залежно від значення прискорення α , досягати будь-якого значення. Другий доданок, тобто силу інерції, називають реактивним опором. Звідси витікає, що імпеданс, або повний опір, дорівнює сумі активного і реактивного опорів.

Це визначення робить зрозумілим, чому термін «імпеданс» недоцільно перекладати українською мовою і пояснювати його за допомогою простих аналогій, наприклад, витікання рідини через широкий або вузький отвір, або порівнювати з опором R_a в колах постійного струму. Всі подібні пояснення залишають поза увагою головну, а саме реактивну, частину імпедансу R_r .

Сили інерції набувають особливого значення і можуть досягати великих значень у тих процесах, де відбувається зміна швидкості v , наприклад, у коливальних процесах, у колах змінного струму і, особливо, в реактивних двигунах.

При постійності швидкості v , тобто у будь-якому стаціонарному процесі, де прискорення $\alpha = 0$, чи це рух твердого тіла, електронів, частинок повітря або рідини в трубах, реактивна частина імпедансу $R_r = 0$ і $Z = R_a$. Наприклад, під час бігу спортсмен починає дихати через рот, зменшуючи таким чином опір R_a ; аналогічне збільшення поперечного перерізу дроту зменшує його опір руху електронів при постійному електричному струмі.

Під час фонації частинки повітря рухаються не з постійною швидкістю v , а здійснюють дуже швидкі коливання біля положення рівноваги з частотами ω , що лежать у межах від 15 до 16 000 коливань за секунду (1/с). Ці частоти називаються звуковими. Щоб отримати уявлення про «поведінку» імпедансу в коливальних процесах, виконаємо інший мислений дослід, але вже не з металевим кубом, а з фізичним маятником. Підвісимо на мотузці, наприклад, гирю масою кілька десятків кілограмів і почнемо її

розгойдувати. З фізики відомо, що період коливань маятника T практично не залежить від амплітуди коливань (максимальне відхилення від положення спокою) і визначається довжиною мотузки. Маятник на короткій мотузці коливається швидше, ніж на довгій. Таким чином, будь-який маятник має власний період T_0 і, отже, власну частоту коливань

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0}. \text{ Власну частоту можна назвати резонансною частотою.}$$

Наш експериментальний маятник ми можемо розгойдувати різними способами: або підтримуючи легкими поштовхами його власну резонансну частоту, або штовхаючи маятник з двох сторін з довільною частотою ω і примушуючи його здійснювати вимушені коливання. Отже, дамо перший поштовх маятнику. Він почне здійснювати затухаючі коливання. Період T_0 і, отже, його власна частота ω_0 залишаться незмінними, але амплітуда коливань почне швидко зменшуватися. Так поступово зменшується сила звуку камертона, зберігаючи незмінною свою висоту, тобто ω_0 . Куди зникла енергія нашого першого поштовху, передана маятнику? Вона була затрачена на подолання активних опорів R_a (опір повітря, тертя у підвісі). Далі ми переконаємося, що за допомогою дуже слабких поштовхів, періодичність яких відповідатиме резонансній частоті маятника, неважко підтримувати амплітуду коливань маятника незмінною і компенсувати втрати енергії, викликані наявністю активного опору R_a . Він, як і в першому прикладі, невеликий. Звідси можна стверджувати, що активна складова імпедансу також не є вирішальним чинником, що визначає характер коливального процесу. Розглядаючи процес фонації, ми можемо сказати, що обтічна і зручна форма ротоглоткового рупора сприяє зменшенню активних опорів, зменшує згасання і даремну витрату звукової енергії, але було б помилково зробити висновок, що хороший ротоглотковий (гладкий) рупор – це умова, достатня для забезпечення потужності співочого голосу. Далі ми побачимо, що вирішальна роль належить реактивній частині імпедансу і динамічним процесам.

Зазначимо, що ніхто з людей, хто володіє здоровою носоглоткою, навіть при посиленому диханні через рот ніколи не скаржився на поганий ротоглотковий рупор, що створює опір диханню. Зазвичай, ніхто цього опору й не помічає.

У нашому прикладі дуже просто з'ясовується і роль реактивної складової імпедансу R_r , пов'язаної з виникненням сил інерції. Для цього досить змусити маятник здійснювати вимушені коливання з довільною частотою ω , штовхаючи його у різних фазах (можна давати зустрічний імпульс або прикладати імпульс услід маятнику, що віддаляється). Здійснюючи подібний експеримент насправді, можна не тільки переконатися в різноманітті форм коливального процесу і отримати уявлення про значення сил інерції, тобто реактивну складову імпедансу, але разом й травмувати руку. Таким чином, неважко зрозуміти, що імпеданс може бути захисним механізмом тільки тоді, коли він використовується в належній фазі. Повітря у кожній порожнині ротоглоткового рупора (резонатора) має свою власну частоту ω і здійснює, як правило, не власні, а вимушені коливання в усьому діапазоні частот співочого голосу. Тому дійсна картина явищ резонансу в співочому голосі мало відповідає уявленням, поширеним у вокальній педагогіці.

Частинки повітря в ротоглоткових порожнинах здійснюють пружні коливання, тому ще ближчою буде аналогія не з фізичним маятником, а з вантажем, підвішеним на пружині. Даючи поштовхи цьому вантажу і примушуючи його за нашим бажанням здійснювати вимушені коливання з різними частотами ω , ми виявимо, що окрім сил інерції, що розвиває вантаж, з'являється ще додатковий чинник – жорсткість пружини, або її здатність накопичувати ту або іншу кількість енергії і повертати її назад при

розпрямленні. Це означає, що реактивна частина імпедансу залежить не тільки від частоти коливань ω , але й від інертної маси L , і від пружних властивостей системи, що коливається, від її «ємності» C – у в сенсі більшого або меншого накопичення енергії.

Отже, для всіх можливих форм руху, включаючи і процеси коливань, імпеданс – це сума активного і реактивного опорів, або $Z = R_a + R_r$. Для механічного поступального руху $Z = R_a + ma$; для коливальних процесів – механічних, звукових або електричних – $Z = R_a + f(\omega, L, C)$, де $f(\omega, L, C)$, є складною функцією трьох величин – ω , L , C . За допомогою математичного апарату диференціальних рівнянь доводиться, що останню суму можна представити з вигляді

$$Z = \sqrt{R_a^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} . (1)$$

З формули (1) видно, що імпеданс у будь-якому коливальному процесі дорівнює квадратному кореню з суми квадратів активного і реактивного опорів. Якщо реактивний опір дорівнює нулю, тобто $(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = 0$, то $Z = \sqrt{R_a^2 + 0} = R_a$, або в окремому випадку імпеданс може бути рівний активному опору. Ми вже зазначили, що при явищах резонансу, коли маятник розгойдували з його власною частотою, енергія наших імпульсів (поштовхів) йшла або на подолання активного опору R_a , або на швидке збільшення амплітуди. Відомо, що незначний за своїм абсолютним значенням звуковий тиск людського голосу у разі резонансу може призвести в коливальний стан жорсткі струни роялю. Формула (1) є універсальною; вона дає вираз імпедансу для акустичних процесів у ротоглотковому рупорі, колах змінного струму і радіотехнічних контурів, в яких відбуваються коливання електронів. З цієї причини сучасна теоретична акустика і теорія голосоутворення широко використовують електричні аналогії і базуються на понятті імпедансу.

Використана література:

1. Емельянов В.В. Развитие голоса. Координация и тренаж / В. В. Емельянов. – СПб. : Лань, 1997. – 192 с.
2. Морозов В. П. Тайны вокальной речи / В. П. Морозов. – Ленинград : Наука, 1967. – 204 с.
3. Юссон Р. Певческий голос / Р. Юссон. – М. : Музыка, 1974. – 262 с.

Аннотація

В статті розглядається фізична сутність імпедансу, показана його роль в певчому голосі. Приведені приклади експериментів, які пояснюють імпеданс.

Ключові слова: імпеданс, певчий голос, голосообразование.

Annotation

Physical essence of impedance is examined in the article, his role is outlined in singing voice. The examples of experiments which explain an impedance are resulted.

Keywords: impedance, singing voice, phonation.