

УДК 658.382

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ С ЦЕЛЬЮ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОСТИ ТРУДА РАБОТНИКОВ РЕЧЕВЫХ ПРОФЕССИЙ

USE OF A METHOD OF THE ELECTROACOUSTICAL ANALOGIES FOR THE PURPOSE CALCULATION INTENSITY LABOR OF THE WORKERS OF THE VOCAL PROFESSIONS

Пронин Анатолий Павлович

кандидат технических наук,
доцент кафедры техносферной и
экологической безопасности.
Петербургский государственный университет
путей сообщения
Тел.: 8(812) 272-95-58, 8(905) 288-62-14

Зальцман Геннадий Константинович

кандидат технических наук,
профессор кафедры техносферной и
экологической безопасности.
Петербургский государственный университет
путей сообщения
Тел.: 8(812) 687-35-66, 8(921) 333-56-10

Клюкина Ирина Владимировна

кандидат технических наук,
генеральный директор производственно-
логистической компании «ИР-сервис»
Тел.: 8(812) 645-26-91, 8(911) 259-14-87

Аннотация. Предложена методика расчета нагрузки на голосовой аппарат для уточнения расчета напряженности труда работников речевых профессий.

Ключевые слова: напряженность труда, нагрузка на голосовой аппарат, электроакустические аналогии.

Pronin Anatoliy Pavlovich

Ph.D., Ass. Professor department of
tekhnosfernoy and ecological safety.
Petersburg state University of
Communications
Ph.: 8(812) 272-95-58, 8(905) 288-62-14
set@id-yug.com

Zaltsman Gennadiy Konstantinovich

Ph.D., Professor department of
tekhnosfernoy and ecological safety.
Petersburg state University of
Communications
Ph.: 8(812) 687-35-66, 8(921) 333-56-10

Klukina Irina Vladimirovna

Ph.D., Director-General of productive-
logistic company "IR-service"
Ph.: 8(812) 645-26-91, 8(911) 259-14-87

Annotation. The procedure of design load on the vocal apparatus for refining the calculation intensity labor of the workers of vocal professions is proposed.

Keywords: the intensity of labor, load on the vocal apparatus, the electroacoustical analogies.

Известно, что значительное число работников так называемых «речевых» профессий (певцы, драматические актёры, педагоги, авиа и железнодорожные диспетчеры, дежурные по железнодорожным станциям и т.п.) вынуждены работать в условиях, когда нагрузка на голосовой аппарат, а следовательно, и напряженность трудового процесса (напряженность труда), достигает критических величин, что при длительном стаже работы приводит к хроническим заболеваниям голосового аппарата [1, 2].

В то же время объективных методик расчета нагрузки на голосовой аппарат не существует, поэтому в гигиенических критериях для оценки ее влияния на напряженность трудового процесса принят такой примитивный показатель, как «суммарное количество часов, наговариваемое в неделю», при этом нагрузка на голосовой аппарат при шепоте и крике будет оценена одинаково [3]. Это приводит к неоправданно завышенной оценке напряженности трудового процесса в первом случае и заниженной во втором. С целью ликвидации указанного несоответствия авторами разработан метод расчета нагрузки на голосовой аппарат, в котором широко используются электроакустические аналогии. Суть метода заключается в том, что акустическая конструкция,

которую представляет собой голосовой аппарат и методик расчета которой не существует, заменяется на аналогичную электрическую схему. Затем эта схема рассчитывается с помощью теории электрических цепей, подробно разработанную в электротехнике, а полученные результаты снова конвертируются в акустические величины. На представленном рисунке слева показан разрез голосового аппарата человека, справа его акустический аналог, где он смоделирован в виде четырех цилиндрических отрезков. На аналоговой схеме слева расположены голосовые складки. Известно, что усталость голосовых складок при их колебаниях, определяющая голосовую нагрузку, характеризуется их колебательной скоростью, поэтому за эквивалент нагрузки принята объемная скорость воздуха V_0 , создаваемая складками, которая в системе электроакустических аналогий моделируется током i_0 (рис. 1).

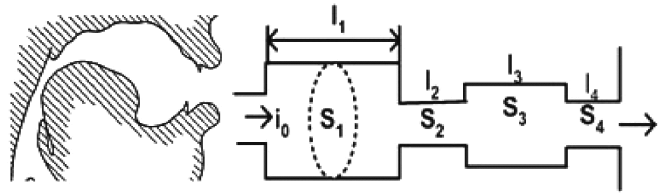


Рисунок 1 – Голосовой аппарат человека (слева) и его акустический аналог

Длины отрезков обозначены как l_1 , l_2 , l_3 и l_4 , сечения соответственно S_1 , S_2 , S_3 и S_4 . l_1 представляет собой гортань с сечением S_1 , l_2 – сужение между языком и небом, l_3 – ротовую полость, l_4 – ротовое отверстие между губами. Объемная скорость на выходе ротового отверстия моделируется током i .

Электрическим аналогом элементарного цилиндрического отрезка, который представляет собой акустическую линию с распределенными параметрами, является Т-образный четырехполюсник, в котором последовательные плечи представляют собой индуктивности, а параллельный элемент – емкость.

Каждая индуктивность в системе аналогий – это половина массы воздуха в отрезке, а емкость – его податливость. Обозначив последовательные плечи как Z_1 , а параллельное плечо как Z_2 , из теории четырехполюсников получим (рис. 2):

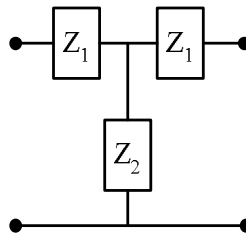


Рисунок 2 – Четырехполюсник, эквивалентный элементарной секции голосового аппарата

$$Z_1 = Z_0 \operatorname{th} \frac{\Gamma l}{2}, \quad (1)$$

$$Z_2 = Z_0 \operatorname{csc} h \Gamma l, \quad (2)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (3)$$

$$\Gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \quad (4)$$

здесь R , L , G , и C есть соответственно сопротивление, индуктивность, проводимость и емкость, отнесенные к единице длины отрезка l , Z_0 – характеристический импеданс, Γ – постоянная распространения.

R и G – это вязкое сопротивление и поглощение энергии стенками цилиндрической секции, величины которых настолько малы, что ими можно пренебречь.

В свою очередь, L и C определяются по формулам:

$$L = \frac{\rho_ч}{S}, \quad (5)$$

$$C = \frac{S}{\rho_ч c_ч^2}, \quad (6)$$

где $\rho_ч$ – плотность воздуха при температуре человеческого тела, т.е. при +36 °C; $c_ч$ – скорость звука при той же температуре.

Тогда подставим (5) и (6) в (3) и (4):

$$Z_0 \approx \frac{\rho_ч c_ч}{S}, \quad (7)$$

$$\Gamma = \frac{j\omega}{c_ч}. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) подставим в уравнения (3) и (4), определяющие величины плеч четырехполюсника. Принимая во внимание известные соотношения между тригонометрическими и гиперболическими функциями, получим:

$$Z_1 = \left(\frac{\rho_ч c_ч}{S} \right) \operatorname{th} j \left(\frac{\omega l}{2c_ч} \right) = j \left(\frac{\rho_ч c_ч}{S} \right) \operatorname{tg} \frac{\omega l}{2c_ч}, \quad (9)$$

$$Z_2 = \left(\frac{\rho_ч c_ч}{S} \right) \operatorname{csch} j \left(\frac{\omega l}{c_ч} \right) = -j \left(\frac{\rho_ч c_ч}{S} \right) \operatorname{csc} \frac{\omega l}{c_ч}. \quad (10)$$

На вход электроакустической схемы голосового тракта, состоящей из четырех последовательно включенных четырехполюсников, подаются пилообразные колебания, создаваемые голосовыми складками. Выход цепи нагружен на сопротивление излучения ротового отверстия.

Значения активной R_u и реактивной L_u , составляющих сопротивления излучения, получены Крендаллом [4].

$$R_u = \frac{\rho_ч \omega^2}{2\pi c}, \quad (11)$$

$$L_u = \frac{8\rho_ч}{3\pi^2 r}. \quad (12)$$

где r – радиус ротового отверстия, который согласно Морзу [5], в среднем составляет 1,6 см.

Полученная схема может быть упрощена, если пренебречь некоторыми ее элементами, не имеющими существенного значения для достигаемого результата. Опуская суть сделанных упрощений и преобразований, в конечном итоге голосовой тракт можно представить как два последовательно включенных Г-образных четырехполюсника. Последовательное плечо первого четырехполюсника обозначим X_{L1} , второго X_{L2} , соответственно параллельные звенья как X_{C1} и X_{C2} . Для простоты $\rho_ч$ и $c_ч$ обозначим просто как ρ и c . Тогда получим:

$$X_{C1} = \frac{\rho c}{S_1} \operatorname{tg} \frac{\omega l_1}{2c}, \quad (13)$$

$$X_{C2} = \frac{\rho c}{S_3} \operatorname{csc} \frac{\omega l_3}{c}, \quad (14)$$

$$X_{L1} = \frac{\rho c}{S_1} \operatorname{tg} \frac{\omega l_1}{2c} + 2 \frac{\rho c}{S_2} \operatorname{tg} \frac{\omega l_2}{2c} + \frac{\rho c}{S_3} \operatorname{tg} \frac{\omega l_3}{2c}, \quad (15)$$

$$X_{L2} = \frac{\rho c}{S_3} \operatorname{tg} \frac{\omega l_3}{2c} + 2 \frac{\rho c}{S_4} \operatorname{tg} \frac{\omega l_4}{2c} + \frac{8\rho\omega}{3\pi^2 r}. \quad (16)$$

Принимая во внимания, что i – эквивалент объемной скорости у ротового отверстия, а i_0 – эквивалент объемной скорости при прохождении голосовой щели, т.е. эквивалент нагрузки на голосовые складки, получим, что голосовая нагрузка связана с объемной скоростью в створе ротового отверстия соотношением:

$$i_0 = i \left[\left(\frac{X_{L1}}{X_{C1}} - 1 \right) \left(\frac{X_{L2}}{X_{C2}} - 1 \right) - \frac{X_{L2}}{X_{C2}} \right]. \quad (17)$$

Если считать, что излучение звука ротовым отверстием происходит в открытое пространство и учесть известные соотношения между мощностью источника излучения W , интенсивностью звука I и звуковым давлением P , то в конечном итоге получим окончательное выражение для расчета голосовой нагрузки:

$$i_0 = \frac{2,8P}{\rho f} i \left[\left(\frac{X_{L1}}{X_{C1}} - 1 \right) \left(\frac{X_{L2}}{X_{C2}} - 1 \right) - \frac{X_{L2}}{X_{C2}} \right], \quad (18)$$

где f – частота излучаемого звука; P – звуковое давление на расстоянии 1 м от говорящего.

Голос абсолютно не напрягается, если на расстоянии 1 м от говорящего уровень звукового давления L равен 60 дБ, или $P = 0,02$ Па. Эту величину, подставленную в выражение (18), и следует принять за норму нагрузки на голосовой аппарат, умноженную на оптимальное время наговаривания согласно [3].

Литература:

1. Плешков И.В. Заболевания голосового аппарата у вокалистов и представителей речевых профессий: Диагностика, лечение, реабилитация. – М. : Геотар-мед, 2003. – 165 с.
2. Клюкина И.В. Методическое и техническое обеспечение оптимизации нагрузки на голосовой аппарат работников железнодорожного транспорта : Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2007. – 20 с.
3. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Р 2.2.2006-05.
4. Crandalle I.B. Dynamical study of the vowel sounds // Bell System Technology Journal. – 1927. – V. 24. – P. 100–116.
5. Морз Ф. Колебания и звук. – М. : Гостехиздат, 1949. – 496 с.

References:

1. Pleshkov I.V. Diseases of vocal apparatus in vocalists and representatives of the vocal professions: Diagnostics, treatment, rehabilitation. – M. : Geotar-med, 2003 – 165 p.
2. Klyukina I.V. Systematic and technical support of optimization of load on the vocal apparatus of the workers of rail transport : Author's abstract of thesis to the competition of the scientific degree of Candidate in Technical Sciences. – Saint Petersburg, 2007. – 20 p.
3. Leadership according to the hygienic estimation of the factors of working medium and working process. R 2.2.2006-05.
4. Crandalle I.B. Dynamical study of the vowel sounds // Bell System Technology Journal. – 1927. – V. 24. – P. 100–116.
5. Morse F. Fluctuations and sound. – M. : State Technical Press, 1949. – 496 p.