

И.И. Кириченко

СИСТЕМА АНАЛИЗА ДАННЫХ ОБЪЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СЛУХА

Решение задачи ранней диагностики заболеваний слуха человека является актуальным для проводимых профилактических обследований населения. Для целей диагностики слуха традиционно используются субъективные методы обследования, такие как тональная аудиометрия и речевая аудиометрия, а также объективные методы, одним из которых является тимпанометрия. Эти методы предусматривают графическое представление результатов. На качественную и количественную оценку полученных результатов, в особенности на анализ и принятие решений по таким характеристикам, как форма и конфигурация тональных аудиограмм, речевых аудиограмм и тимпанограмм, оказывает влияние субъективность оценки разными экспертами. При этом различие в оценках может быть значительным, что влияет на точность постановки диагноза. В данной работе представлена структурная схема биотехнической системы диагностики нарушений слуха, которая позволяет реализовать статистические методы анализа тимпанограмм. С использованием исходных данных результатов импедансной аудиометрии, для произвольной тимпанограммы пациента с диагнозом отит был проведен регрессионный анализ тимпанограмм типа С. Вычислялось среднее значение коэффициента корреляции для внутрибарабанного давления и среднеквадратической отклонение. Результаты анализа данных по оценке силы корреляционной связи тональных аудиограмм, соответствующих нарушениям звуковосприятия и звукопроводимости при отите, и тимпанограмм, представленных в данной работе, позволяют сделать вывод о том, что в качестве значащего признака силы связи можно учитывать знак коэффициента корреляции для рассматриваемых случаев отклонения от нормы. По результатам оценки корреляционной связи тимпанограмм построены корреляционные графы. В случае анализа тимпанограмм был использован коэффициент ранговой корреляции Спирмена. В соответствие со стандартными пороговыми значениями коэффициента корреляции были установлены связи, для которых значение коэффициента корреляции оказалось ниже порогового значения. Построенные корреляционные плеяды позволили сократить число связей анализируемых параметров за счет исключения менее статистически значимых.

Биотехническая система; тимпанограмма; коэффициент корреляции; корреляционный граф,

I.I. Kirichenko

SYSTEM OF ANALYSIS OF THE OBJECTIVE METHODS DATA IN DIAGNOSTICS OF HEARING

The solution of the early diagnosis of human diseases hearing problem is relevant for ongoing preventive population surveys. For purposes of the hearing diagnostics traditionally used are the subjective methods of examination, such as tone and speech audiometry and the objective methods, one of which is tympanometry. These methods provide a graphical representation of the results. On the qualitative and quantitative assessment of the results, particularly in the analysis and decision-making on characteristics such as the shape and configuration of the tone audiogram, speech audiogram and tympanograms affects subjectivity of evaluation by different experts. This difference in estimates can be significant, affecting the accuracy of the diagnosis. In this paper, a block diagram of biotechnical system diagnostics of hearing impairment, which allows realizing the statistical methods of tympanograms analy-

sis. Using the raw data results of impedance audiometry tympanogram for a patient with a diagnosis of otitis a regression analysis of the type C tympanograms has been conducted. Calculated is the average value of the correlation coefficient for pressure inside the eardrum and standard deviation. Построенные корреляционные плеяды позволили сократить число связей анализируемых параметров за счет исключения менее статистически значимых. On the basis of the results of the tympanograms correlation link evaluation the correlation graphs are built. In the tympanograms analysis the Spearman's rank correlation coefficient has been used. In accordance with the standard correlation coefficient values established have been the links for which the value of the correlation coefficient was below the threshold. The built correlation galaxies have allowed reducing the number of links between the analyzed parameters by eliminating the less statistically significant.

Biotechnical system; tympanogram; the correlation coefficient; correlation graph.

Введение. При проведении диспансеризации населения большое внимание уделяется разработке отечественных приборов и методов диагностики. Для диагностики слуха человека широко применяют методы исследования, такие как тональная аудиометрия и речевая аудиометрия, импедансная аудиометрия. Традиционное применение субъективных и объективных методов подробно описано в отечественных и зарубежных руководствах и монографиях [1–9]. Особенностью традиционных методов исследования слуха графическое представление результатов в виде тональных аудиограмм, речевых аудиограмм и тимпанограмм. По полученным результатам визуально осуществляется диагностика состояния слуха. На оценку полученных графических результатов оказывает влияние субъективность принятия решений экспертами. В аудиологической практике разница в оценке может быть значительной. Это оказывает влияние на точность диагностики традиционными методами исследования слуха.

Постановка задачи. Современные диагностические приборы позволяют автоматизировать весь процесс получения диагностической информации, а также ее представление в виде графиков, диаграмм и таблиц. Задача повышения достоверности методов исследования слуха с использованием различных статистических методов анализа рассматривалась ранее в ряде работ. При этом предлагаются различные критерии и подходы к формированию и оценке диагностической информации:

- ◆ классификация аудиограмм на основе экспертной информации [10];
- ◆ пороги слышимости в пространстве нечетких признаков [11];
- ◆ разработка электронной библиотеки аудиограмм [12];
- ◆ разработка биотехнической системы анализа данных аудиометрии [13];
- ◆ регрессионный анализ данных аудиометрии [14].

В результате была сформирована база данных тональных пороговых аудиограмм, разработана структура биотехнической системы и алгоритм регрессионного анализа аудиограмм. и проведена, для которой в качестве признака использовался коэффициент корреляции Пирсона. Статистическая оценка данных тональной аудиометрии [14] показала, что учет направления (знак коэффициента корреляции) и силы связи (значение коэффициента корреляции) позволяет получить новый информационный признак отклонения потерь от нормы. В качестве дополнительных признаков авторами было предложено использовать алгоритм определения конфигурации тональных аудиограмм [15] и алгоритм k-внутригрупповых средних. На основе этого алгоритма были вычислены параметры функции принадлежности классов «норма» и «отклонение от нормы».

Регрессионный анализ результатов аудиометрии. Результаты диагностики субъективными методами, к которым относится тональная пороговая аудиометрия, зависят от реакции обследуемого на предъявляемые тональные стимулы. В аудиологической практике этот субъективный момент снижает достоверных полученных данных [1, 2]. В отличие от тональной аудиометрии, импедансная аудиометрия является объективным методом исследования слуха, основанным на измерении акустического импеданса среднего уха [3].

Среди диагностических параметров импедансной аудиометрии выделяют: объем наружного слухового прохода, пик комплианса, давление пика и ширину тимпанограммы [3]. На первом этапе исследований по установлению корреляционной связи параметров тимпанограмм, аналогично исследованиям тональных пороговых аудиограмм, была рассмотрена задача оценки связи двух параметров графического представления: пик комплианса и ширина произвольной тимпанограммы и нормальной тимпанограммы. Область внутрибарабанного давления была разделена на два диапазона: отрицательная область давления (-400 даПа; 0 даПа) и положительная область давления (0; +200 даПа). В качестве исходных данных были использованы нормальные тимпанограммы и тимпанограммы типа С соответствующие диагнозу отит [3]. Для выбранных из базы данных тимпанограмм по формуле Пирсона были рассчитаны значения коэффициента корреляции, определены среднее значение коэффициента корреляции (T) и среднеквадратическое отклонение (СКО_T) [16]. Для полной области внутрибарабанного давления тимпанограмм типа С среднее значение коэффициента корреляции и среднеквадратическое отклонение составили $T=-0,35$; СКО_T=0,12. Результаты расчета для диапазонов отрицательной и положительной областей давления составили $T=-0,41$; СКО_T=0,11 и $T=0,48$; СКО_T=0,15, соответственно [17].

Результаты сравнительного анализа полученных в [14] данных по оценке силы корреляционной связи тональных аудиограмм, соответствующих нарушениям звуковосприятия и звукопроводимости при отите, и тимпанограмм, представленных в данной работе, позволяют сделать вывод о том, что в качестве значащего признака силы связи можно учитывать знак коэффициента корреляции для рассматриваемых случаев отклонения от нормы.

С целью дополнения алгоритмов анализа результатов импедансной аудиометрии [3], разработана структура биотехнической системы импедансной аудиометрии, представленная на рис. 1.

Структуру биотехнической системы импедансной аудиометрии помимо подсистемы тимпанометрии, выполняющую стандартные функции тимпанометра, предложено дополнить базой данных тимпанограмм и подсистемой статистического анализа. Подсистема статистического анализа должна содержать модуль анализа тимпанограмм и модуль классификации.

Для повышения достоверности полученных результатов и постановки диагноза результаты статистического анализа тимпанограмм могут быть дополнены анализом корреляционной связи костно-воздушного интервала, данными речевой аудиометрии, а также применением для анализа данных лингвистических переменных [18–20].

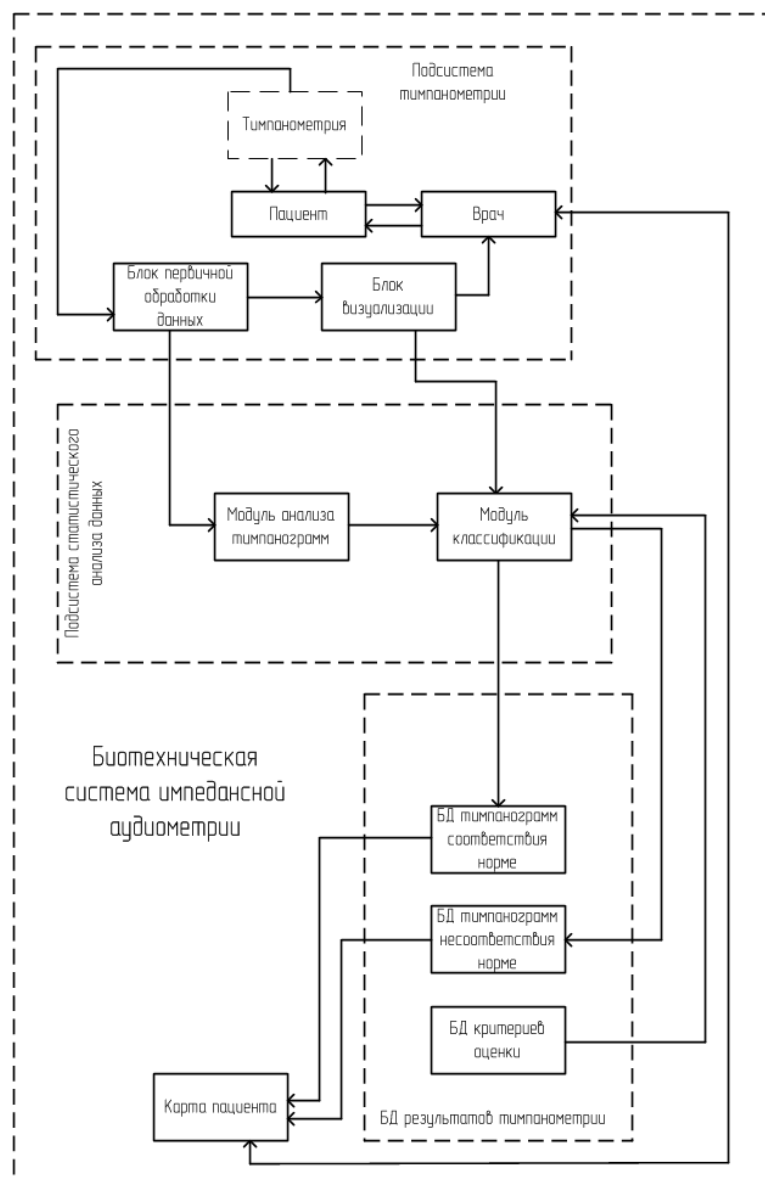


Рис. 1. Биотехническая система импедансной аудиометрии

В зависимости от цели и задач статистического анализа данных исследования состояния слуха можно использовать корреляционный анализ разного уровня сложности [16]. Ранее в работах [14, 17, 19] была установлена взаимосвязь для двух переменных, характеризующих состояние системы слуха: тональных пороговых аудиограмм для костной и воздушной проводимости, соответствующих нормальному слуху и с отклонением от нормы. Результаты исследования слуха дают возможность применять для анализа несколько переменных. В общем случае, их число может быть не ограничено. В проводимых исследованиях для определения величины коэффициента корреляции уровень статистической значимости результата должен быть не ниже $p \leq 0,05$ [16].

Метод корреляционных плеяд в анализе данных аудиометрии. В продолжение исследований, проведенных ранее [14, 17, 19], были составлены корреляционные матрицы и построены корреляционные графы для массивов значений тимпанограмм [20]. Норме соответствует тимпанограмма типа А. Тимпанограмма типа С характеризуется смещением пика давления. Из [3] известно, что данный тип характерен для отита, поэтому для исследования был выбран тип С. Основными параметрами при анализе тимпанограмм являются: объем слухового прохода (ОСП), градиент (Град), подвижность (Подв) и давление в полости среднего уха (ДСП) [3]. При построении корреляционного графа мы получаем визуальное представление о характере связи, поэтому важен выбор типа коэффициента корреляции. В отличие от тональных аудиограмм, в случае тимпанограмм связь не является линейной. В этом случае правильным будет использование коэффициента ранговой корреляции Спирмена [16]. Параметры тимпанограмм были проранжированы (от 1 до 5), определены значения коэффициента ранговой корреляции Спирмена, составлена корреляционная матрица и построен корреляционный граф.

Традиционное деление на слабую ($r > 0 \leq 0,29$), умеренную ($r > 0,30 \leq 0,69$) и сильную ($r > 0,70 \leq 1,00$) корреляцию позволяет применить анализ методом корреляционных плеяд и получить разделение признаков с малой и большой по величине корреляцией r [16]. На рис. 2 показан пример построения корреляционной плеяды для анализа тимпанограммы.

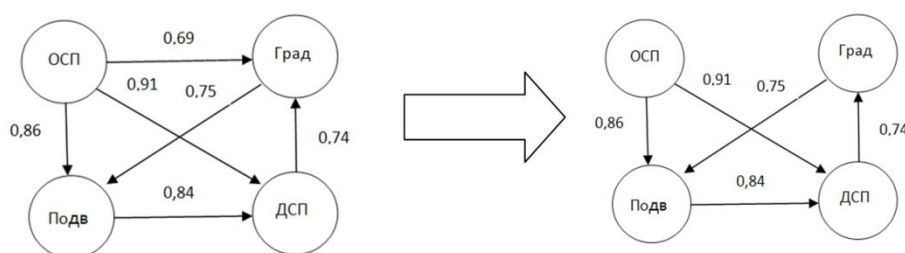


Рис. 2. Корреляционная плеяда тимпанограммы

Задавшись пороговым значением коэффициента корреляции 0,7 (уровень значимости $p \leq 0,05$), исключаем из графа линии, которые соответствуют корреляции, меньше пороговой величины. В полученном корреляционном графе это связь между объемом слухового прохода и градиентом.

Выводы. Построенные корреляционные плеяды позволяют сократить число связей анализируемых параметров за счет исключения менее статистически значимых. При этом достоверность принятых экспертом решений не снижается. Для повышения достоверности количественной оценки силы корреляционной связи тональных аудиограмм и тимпанограмм необходимо увеличить объем выборки исходных данных. Полученные результаты показали возможность применения данных расчетов в корреляционной адаптометрии, что позволит при проведении профилактических осмотров определять без большого объема вычислений наличие отита, а также другие заболевания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Альтман Я.А., Таварткиладзе Г.А.* Руководство по аудиологии. – М.: ДМК Пресс, 2003. – 360 с.
2. *Джафек Б.У., Старк Э.К.* Секреты оториноларингологии. – М. – СПб.: БИНОМ – Невский диалект, 2001. – 624 с.
3. *Кочкин Р.В.* Импедансная аудиометрия. – М.: Медицина, 2006. – 48 с.
4. *Kemp D.T.* Otoacoustic emissions, their origin in cochlear function, and use // *British Medical Bulletin.* – 2002. – Vol. 63. – P. 223-241.
5. *Jedrzejczak W., Blinowska K.J.* Identification of otoacoustic emissions components by means of adaptive approximations // *JASA.* – 2004. – Vol. 115, No. 5. – P. 2148-2158.
6. *Warwick Williams.* Noise exposure levels from personal stereo use // *International Journal of Audiology.* – 2005. – Vol. 44. – P. 231-236.
7. *Neitzel R., Seixas N., Olson J., Daniell W., Goldman B.* Nonoccupational noise exposures associated with routine activities // *J Acoust Soc Am.* – 2004. – Vol. 115 (1). – P. 237-245.
8. *Rice C.G., Breslin M., Roper R.G.* Sound levels from personal cassette players // *Br J Audiol.* – 1987. – Vol. 21. – P. 273-278.
9. *Smith P.A., Davis A., Ferguson M., Lutman M.E.* The prevalence and type of social noise exposure in young adults in England // *Noise Health.* – 2000. – Vol. 6. – P.41-56.
10. *Абу.-Мандил Н., Филатова Н.Н.* Автоматизированная система диагностики нарушений слуха // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ».* Сер. «Биотехнические системы в медицине и экологии». – 2006. – № 2– С. 104-108.
11. *Миловидов А.А., Филатова Н.Н.* Программный комплекс для лингвистической интерпретации графических зависимостей с нечеткими координатами // *Программные продукты и системы.* – 2011. – № 3. – С. 110-114.
12. *Бондаренко Р.П., Кириченко И.А., Салов В.В.* Концепция разработки электронной библиотеки аудиограмм // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2008. – № 5 (82). – С. 157-159.
13. *Бондаренко Р.П., Кириченко И.И.* Биотехническая система компьютерного анализа данных аудиометрии // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2009. – № 7 (96). – С. 29-34.
14. *Бондаренко Р.П., Кириченко И.И., Черноморченко С.Г.* Применение регрессионного анализа данных в аудиометрии // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2010. – № 9 (110). – С. 199-200.
15. *Бондаренко Р.П., Заграй Н.П., Кириченко И.И., Фирсова Т.Б.* Метод определения конфигурации тональных аудиограмм // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2009. – № 10 (99). – С. 239-241.
16. *Юнкеров В.И., Григорьев С.Г.* Математико-статистическая обработка данных медицинских исследований. – СПб.: ВМедА, 2002. – 266 с.
17. *Кириченко И.А., Кириченко И.И., Кумова Д.М.* Регрессионный анализ результатов субъективных и объективных методов диагностики слуха // *Научно-практическая конференция «Нелинейная акустика-50»:* Сб. трудов. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 156-160.
18. *Кириченко И.И.* Моделирование тестовых сигналов тональной и речевой аудиометрии // *Сб. трудов научной конференции «Сессия научного Совета РАН по акустике».* Т. 3. – М.: ГЕОС, 2012. – С. 28-31.
19. *Кириченко И.И., Лащенко К.А.* Моделирование системы анализа данных речевой аудиометрии // *Известия ТТИ ЮФУ–ДонНТУ.* Материалы Тринадцатого Международного научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». В 3-х кн. Кн. 2. – Таганрог. Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – № 12. – С. 76-81.
20. *Бондаренко Р.П., Чернов Н.Н., Кириченко И.И., Кириченко И.А.* Применение корреляционных графов для анализа результатов диагностики нарушений слуха методами аудиометрии // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2017. – № 4 (189). – С. 254-261.

REFERENCES

1. *Al'tman Ya.A., Tavartkiladze G.A.* Rukovodstvo po audiologii [Guidelines for Audiology]. Moscow: DMK Press, 2003, 360 p.
2. *Dzhafek B.U., Stark E.K.* Sekrety otorinolaringologii [Secrets of otorhinolaryngology]. Moscow – Saint Petersburg: BINOM – Nevskiy dialekt, 2001, 624 p.
3. *Kochkin R.V.* Impedansnaya audiometriya [Impedance audiometry]. Moscow: Meditsina, 2006, 48 p.

4. *Kemp D.T.* Otoacoustic emissions, their origin in cochlear function, and use, *British Medical Bulletin*, 2002, Vol. 63, pp. 223-241.
5. *Jedrzejczak W., Blinowska K.J.* Identification of otoacoustic emissions components by means of adaptive approximations, *JASA*, 2004, Vol. 115, No. 5, pp. 2148-2158.
6. *Warwick Williams.* Noise exposure levels from personal stereo use, *International Journal of Audiology*, 2005, Vol. 44, pp. 231-236.
7. *Neitzel R., Seixas N., Olson J., Daniell W., Goldman B.* Nonoccupational noise exposures associated with routine activities, *J Acoust Soc Am.*, 2004, Vol. 115 (1), pp. 237-245.
8. *Rice C.G., Breslin M., Roper R.G.* Sound levels from personal cassette players, *Br J Audiol.*, 1987, Vol. 21, pp. 273-278.
9. *Smith P.A., Davis A., Ferguson M., Lutman M.E.* The prevalence and type of social noise exposure in young adults in England, *Noise Health*, 2000, Vol. 6, pp.41-56.
10. *Abu.-Mandil N., Filatova N.N.* Avtomatizirovannaya sistema diagnostiki narusheniy slukha [The automated system of diagnostics of hearing impairment], *Izvestiya SPbGETU «LETI». Ser. "Biotekhnicheskie sistemy v meditsine i ekologii"*. [Izvestiya SPbGETU «LETI. Series of "Biotechnical systems in medicine and ecology"], 2006, No. 2, pp. 104-108.
11. *Milovidov A.A., Filatova N.N.* Programmnyy kompleks dlya lingvisticheskoy interpretatsii graficheskikh zavisimostey s nechetkimi koordinatami [Software for linguistic interpretation of plots with unclear coordinates], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2011, No. 3, pp. 110-114.
12. *Bondarenko R.P., Kirichenko I.A., Salov V.V.* Kontseptsiya razrabotki elektronnoy biblioteki audiogramm [The concept of developing an electronic library audiogram], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 5 (82), pp. 157-159.
13. *Bondarenko R.P., Kirichenko I.I.* Biotekhnicheskaya sistema komp'yuternogo analiza dannykh audiometrii [Biotechnical system of computer analysis audiometry] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 7 (96), pp. 29-34.
14. *Bondarenko R.P., Kirichenko I.I., Chernomorchenko S.G.* Primenenie regressionnogo analiza dannykh v audiometrii [Application of regression analysis in audiometry], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 9 (110), pp. 199-200.
15. *Bondarenko R.P., Zagray N.P., Kirichenko I.I., Firsova T.B.* Metod opredeleniya konfiguratsii tonal'nykh audiogramm [The method of determining the configuration of the tone audiogram], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 10 (99), pp. 239-241.
16. *Yunkerov V.I., Grigor'ev S.G.* Matematiko-statisticheskaya obrabotka dannykh meditsinskikh issledovaniy [Mathematical and statistical processing of medical research]. Saint Petersburg: VMedA, 2002, 266 p.
17. *Kirichenko I.A., Kirichenko I.I., Kumova D.M.* Regressionnyy analiz rezul'tatov sub"ektivnykh i ob"ektivnym metodov diagnostiki slukha [Regression analysis of the subjective and objective hearing diagnostic methods], *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nelineynaya akustika-50»: Sb. trudov* [Scientific-practical conference "Nonlinear acoustics-50": Collection of works]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 156-160.
18. *Kirichenko I.I.* Modelirovanie testovykh signalov tonal'noy i rechevoy audiometrii [Simulation test signal tone and speech audiometry], *Sb. trudov nauchnoy konferentsii «Sessiya nauchnogo Soveta RAN po akustike»* [Proceedings of the scientific conference "Session of scientific Council of RAS on acoustics"]. Vol. 3. Moscow: GEOS, 2012, pp. 28-31.
19. *Kirichenko I.I., Lashchenko K.A.* Modelirovanie sistemy analiza dannykh rechevoy audiometrii [Simulation data analysis system proceedings of speech audiometry], *Izvestiya TTI YuFU–DonNTU. Materialy Trinadtsatogo Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminara «Praktika i perspektivy razvitiya partnerstva v sfere vysshey shkoly»* [Izvestiya TRTU–DonNTU. Materials of XIII International scientific-practical seminar "Practice and prospects of partnership in higher education"]. In 3 booky. Book 2. Taganrog. Izd-vo TTI YuFU, 2012, No. 12, pp. 76-81.

20. Bondarenko R.P., Chernov N.N., Kirichenko I.I., Kirichenko I.A. Primenenie korrelyatsionnykh grafov dlya analiza rezul'tatov diagnostiki narusheniy slukha metodami audiometrii [The use of correlation graphs to analyze the results of diagnostics of hearing impairment audiometry methods], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 4 (189), pp. 254-261.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.

Кириченко Инна Игоревна – Южный Федеральный университет; e-mail: ikirichenko@sfedu.ru; г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

Kirichenko Inna Igorevna – Southern Federal University; e-mail: ikirichenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, build. E, Taganrog, GSP 17A, Russia; the department of acoustics and medical technology; graduate student.

УДК 620.192.4

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-179-189

М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЫЗВАННЫХ ЧАСТИЧНЫМИ РАЗРЯДАМИ*

Проведено теоретическое обоснование процессов и механизмов электрического пробоя в изоляционных материалах. Предложена математическая модель количественных и интегральных характеристик частичных разрядов (ЧР) в изоляционных материалах, а также прогнозирование появления включения. На основании расчета характеристик ЧР, установлена связь изменения напряжения зажигания ЧР U_x и кажущегося заряда q от размера дефекта в изоляции, а также изменения напряжения зажигания ЧР U_x и кажущегося заряда q от диэлектрической проницаемости изоляции ϵ . Напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений, а кажущаяся амплитуда ЧР – их разрядную площадь, то есть все геометрические характеристики включений становятся известными. Анализ результатов показал, что измерение параметров ЧР позволяет в комплексе оценивать воздействие на изоляционные материалы различных факторов и определять степень её деградации. ЧР являются мерой степени электрического старения, и интенсивности внешних воздействий механических, температурных и др., оказывают существенное влияние на формирование и развитие дефектов изоляции. Показано, что напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений в изоляционном материале, а кажущаяся амплитуда ЧР - их разрядную площадь на основании. Разработан комплексный подход диагностики силовых кабельных линий (СКЛ) и алгоритм исследований возникновения и развития пробоя, при котором математические модели позволяют определять геометрические характеристики включений и дать количественную оценку остаточного ресурса СКЛ. Предложены критерии (напряжение возникновения частичных разрядов, уровень частичных разрядов, коэффициент старения; коэффициент нелинейности) позволяющие определять и прогнозировать остаточный ресурса – интервал времени развития скрытых дефектов.

Метод диагностики; прогнозирование; тепловой пробой; изоляционные материалы; частичные разряды.

* Работа выполнена при поддержке гранта: Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии, № ВнГр-07/2017-15.