

- акад. наук Беларуси, Ин-т физики им. Б. И. Степанова Нац. акад. наук Беларуси ; редкол.: С. А. Хахомов [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2025. – С. 251–252.
12. Запольский, А. Е. Возможности совершенствования систем катодной защиты магистральных нефтепроводов / А. Е. Запольский // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 24–25 апр. 2025 г. : в 2 ч. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – С. 229–231.

МЕТАД ІНТАНАЦЫЙНЫХ ТАБУЛАТУР ДЛЯ РАСПАЗНАВАННЯ І СІНТЭЗУ ПРАСАДЫЧНЫХ СРОДКАЎ МАЎЛЕННЯ АПАРАТНА-ПРАГРАМНЫМІ СІСТЭМАМІ

Ю. В. Крышнёў², М. У. Буракова², С. Ю. Крышнёў¹, С. А. Дзмітрук²

¹Гомельскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Францыска Скарыны,
Рэспубліка Беларусь

²Гомельскі дзяржаўны тэхнічны ўніверсітэт імя П. В. Сухого,
Рэспубліка Беларусь

Апісваецца метада інтанацыйных табулатур для кадавання прасадых параметраў маўлення (вышыні тону, інтэнсіўнасці, тэмпу) з мэтай іх распазнавання і сінтэзу апаратна-праграмнымі сістэмамі. Разгледжаны акустычныя аспекты гукаўтварэння, сегментныя і супraseгментныя адзінкі мовы, асноўныя функцыі інтанацыі. Прапанавана прадстаўленне інтанацыйнага контуру ў выглядзе паслядоўнасці 8-бітных кодаў, якія адпавядаюць ячэйкам матрыцы 8×8 (табулатыры), дзе камбінацыі бітаў задаюць гучнасць, зрух частаты фарманты і працягласць. Метада дазваляе незалежна перадаваць лічбавыя эквіваленты фундаментальных супraseгментных параметраў, што важна для дакладнага сінтэзу маўлення і ўдасканалення маўленчых інтэрфейсаў. Апісаны этапы рэалізацыі метада: выяўленне акустычных інварыянтаў, распрацоўка метадалогіі аналізу і сінтэзу, стварэнне праграма-тэхнічных сродкаў і базы даных.

Ключавыя словы: інтанацыйныя табулатыры, прасодыя, распазнаванне маўлення, сінтэз маўлення, акустычныя параметры, вышыня тону, інтэнсіўнасць, тэмп, фарманты, сегментныя адзінкі.

METHOD OF INTONATIONAL TABLATURES FOR RECOGNITION AND SYNTHESIS OF PROSODIC SPEECH MEANS BY HARDWARE-SOFTWARE SYSTEMS

Yu. V. Kryshneu², M. V. Burakova², S. Yu. Kryshneu¹, S. A. Dzmitruk²

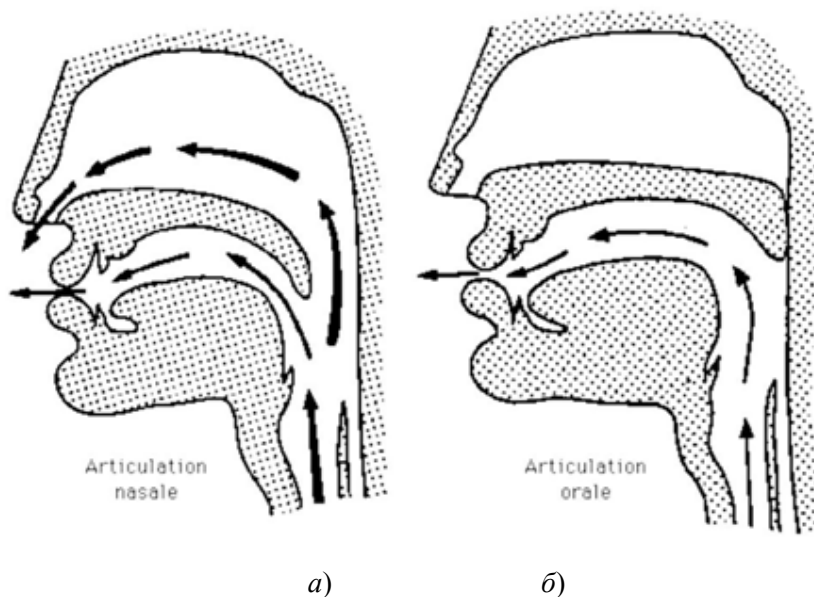
¹Francysk Skaryna State University of Gomel, Republic of Belarus

²Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus

This paper describes a method of intonational tablatures for coding prosodic speech parameters (pitch, intensity, tempo) to enable their recognition and synthesis by hardware-software systems. Acoustic aspects of phonation, segmental and suprasegmental units of language, and the main functions of intonation are considered. The proposed approach represents the intonation contour as a sequence of 8-bit codes corresponding to cells of an 8×8 matrix (tablature), where bit combinations encode loudness, formant frequency shift, and duration. The method allows independent transmission of digital equivalents of fundamental suprasegmental parameters, which is important for accurate speech synthesis and improving speech interfaces. The implementation stages of the method are outlined: identification of acoustic invariants, development of analysis and synthesis methodologies, creation of hardware-software tools, and a database.

Keywords: intonational tablatures, prosody, speech recognition, speech synthesis, acoustic parameters, pitch, intensity, tempo, formants, segmental units.

Аспекты гукавых з’яваў пры артыкуляцыі. Навуковая галіна акустычнай фанетыкі з’яўляецца міждысцыплінарнай і залучае ў свой склад элементы мовазнаўства, анатоміі, фізікі, а ў апошні час – дадаткова інфармацыйна-вымяральнай тэхнікі і праграмавання. Анатамічны аспект неабходны для дэталёвага разгляду пытанняў гукаўтварэння з дапамогай галасавога тракту чалавека. Паслядоўнасць гукаўтварэння можа быць спрошчана прадстаўлена наступным ланцужком. Лёгкія забяспечваюць неабходны ціск паветра і рэгулююць яго сілу, тым самым вырабляючы змены ў інтэнсіўнасці гукаў гаворкі. Непасрэднае гукаўтварэнне адбываецца ў гартані, глотцы, ротавай і носавай парожнінах. Паветраны струмень, які выходзіць з лёгкіх, атрымлівае ў іх важныя змены [1, 2].



Мал. 1. Праходжанне паветранага струменя пры назальнай (а) і аральнай (б) артыкуляцыі

Рухі органаў маўлення змяняюць форму, памер і аб’ём надгартаных парожнін (глоткі, рота і носавай парожніны), тым самым змяняючы голас, які зыходзіць з лёгкіх. У выніку атрымліваецца галосны гук вызначанай якасці.

Калі ў надгартаных парожнінах узнікае перашкода для паветранага струменя, узнікае шум. Характар шуму (трэнне ці выбух) залежыць ад тыпу перашкоды і вызначае адмысловую якасць створаанага пры гэтым зычнага.

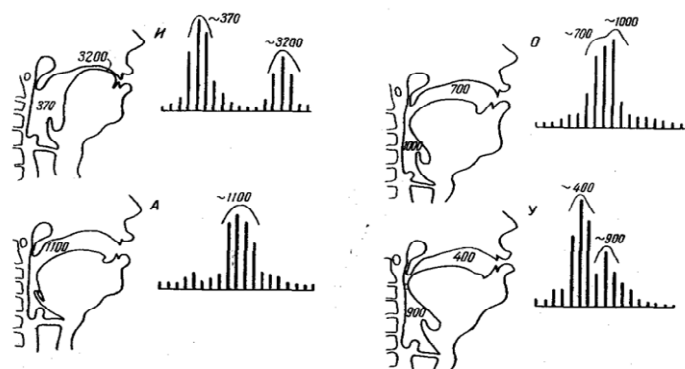
Такім чынам, існуюць дзве асноўныя крыніцы вібрацыі пры адукацыі гукаў гаворкі – галасавыя звязкі і розныя віды перашкод.

Як і любыя іншыя гукі прыроды, гукі гаворкі існуюць у форме гукавых хваляў і маюць тыя ж фізічныя ўласцівасці – частату, інтэнсіўнасць, працягласць і спектр.

Галасавыя звязкі вібуюць такім чынам, што яны вырабляюць розныя віды хваляў адначасова. Асноўныя калыханні галасавых звязак па ўсёй іх даўжыні вырабляюць асноўны тон голасу. Адначасовыя калыханні кожнай часткі галасавых звязак вырабляюць парцыяльныя тоны (абертаны ці гармонікі).

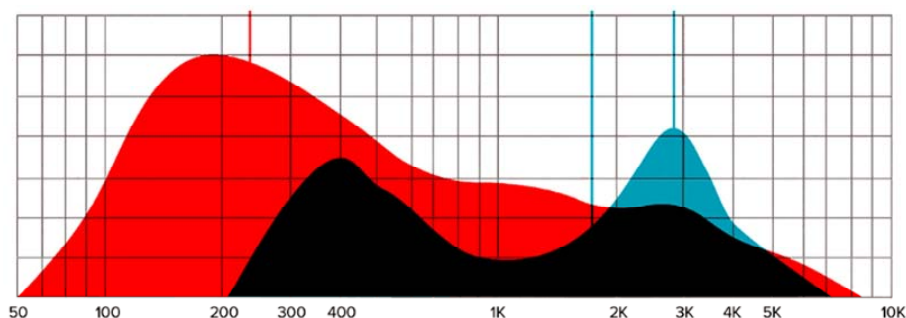
Частата асноўных калыханняў галасавых звязак – гэта асноўная частата (абазначаецца як F_0). Асноўная частата вызначае вышыню голасу і складае акустычную аснову мелодыкі гаворкі. Яна адносна невысокая, каля 40–400 Гц у агульным дыяпазоне голасу. Частоты абертонаў значна вышэй.

Накладанне асноўных і парцыяльных калыханняў прыводзіць да стварэння складанага тону.



Мал. 2. Фарміраванне складанага тону (частоты ўказаны ў герцах)

Галосныя гукі маюць прынамсі дзве фарманты, якія пазначаюцца F_1 і F_2 , якія разам адказваюць за адмысловую якасць кожнага тыпу галоснага. F_1 характарызуецца ніжэйшымі частотамі, F_2 – больш высокімі частотамі. Так, F_1 галоснага /a:/ роўная 800 Гц, а F_2 – 1100 Гц. Фарманты галоснага /i:/ роўныя 380 і 2500 Гц адпаведна.



Мал. 3. Фармантныя структуры розных галосных гукаў

Інтэнсіўнасць гукаў гаворкі залежыць ад амплітуды вібрацыі. Змены інтэнсіўнасці звязаныя з націскам у тых мовах, дзе ёсць дынамічны націск. Інтэнсіўнасць вымяраецца ў дэцыбелах (дБ).

Як і любая іншая форма матэрыі, гук існуе і рухаецца ў часе. Любы гук мае пэўную працягласць. Працягласць гуку – гэта колькасць часу, на працягу якога працягваюцца адны і тыя ж калыханні. Яе прынята вымяраць у мілісекундах.

Артыкуляцыйныя здольнасці чалавека фарміруюць наступныя сегментныя адзінкі маўлення (ад простага да складанага):

Гук – найменшая, далей не падзельная сегментная адзінка.

Склад – сегментная адзінка, якая складаецца са складаўтваральнага элемента (галоснага) ці злучэння складаўтваральнага элемента з адным або некалькімі зычнымі.

Фанетычнае слова – сегментная адзінка, якая ўяўляе сабой або адну словаформу, якая несе на сабе націск, або злучэнне ў струмені мовы націскай словаформы з суседняй безнаціскай словаформай (радзей – з дзвюма безнаціскнымі словаформамі).

Сінтагма – мінімальны інтанацыйна вылучаны, цэласны адрэзак мовы. Сінтагматычная структура звязаная з сэнсавай і сінтаксічнай структурай тэксту.

Выказванне (фраза) – адзінка дзялення струменя мовы, звычайна роўная сказу і прадстаўляе сабой скончаны ў сэнсавым паняцці фрагмент, вылучаны з абодвух бакоў паўзамі.

Інтанацыя і яе функцыі. Эфектыўнасць камунікацыі ў значнай ступені залежыць ад такіх уласцівасцей гаворкі, як варыяцыі вышыні тону, інтэнсіўнасці, тэмпу і тэмбру галаса. Гэта прасадычныя, або несегментарныя (супрасегментныя), уласцівасці, якія ўтвараюць складанае адзінства, якое звычайна называюць інтанацыяй, або прасодыяй выказвання (utterance prosody).

Інтанацыя не толькі з’яўляецца абавязковай структурнай характарыстыкай моўнага выказвання, але і выконвае шэраг важных моўных функцый:

1. Інтанацыя размяжоўвае выказванні і часткі выказванняў у маўленчай плыні на асобныя інтанацыйныя групы – дэлімітатыўная (размежавальная) функцыя.

2. Інтанацыя надае дакладнасць інфармацыі, якая перадаецца ў выказванні, кантрастна сігналізуе аб цэнтральнай кропцы інфармацыі – акцэнтна-інфармацыйнай функцыя.

3. Інтанацыя перадае камунікатыўны намер, г.зн. агульную мэту выказвання – камунікатыўная функцыя.

4. Інтанацыя перадае стаўленне прамоўцы да прадмета выказвання, да слухача, або ягоныя эмоцыі – мадальна-прагматычная (мадальна-эмацыйная) функцыя.

Эфект вылучэння ствараецца комплексам мадыфікацый прасадычных параметраў, якія ў агульным выглядзе можна апісаць як змяненні інтэнсіўнасці, хуткасці артыкуляцыі і вышыні асноўнага тону, злучанае з ударным складам семантычна вылучанага слова.

Абазначэнні інтанацыйных малюнкаў. Існуе шэраг сродкаў для абазначэння прасадычных прыкмет англійскай мовы, найбольш вядомымі з якіх з’яўляюцца [1–7]:

1. Музыкальная натацыя (Дж. Фанагі і К. Мэгдыкс).
2. Танічная натацыя Г. Палмера.
3. Сістэма танічнага націска-знака Р. Кінгдана.
4. Міжрадковыя сістэма.
5. Лічбавая сістэма.
6. Сігнальная сістэма.
7. Лінгвістычная канфігурацыя вышынь Д. Болінера.



Мал. 4. Музыкальная натацыя (Дж. Фанагі і К. Мэгдыкс)

You↑won't/see her if you\go there. (Even if you go there)
 You↑won't\see her if you/go there. (You may if you don't)
 Or again:
 That's from my uncle who lives in London↓ (implies that the speaker has more than one uncle)
 That's from my uncle↑ who lives in London↓ (implies that he has only one uncle)

Мал. 5. Танічная натацыя Г. Палмера

Kinetic Tones:

Tone IH — the High Rising Tone: Shall I 'come?

Tone IL — the Low Rising Tone: I,can't,do it,now.

Tone IHH — the High Falling Tone: I'want it'now.

Tone IIL — the Low Falling Tone: Where's it,now?

Tone III Undivided — the Falling—Rising Tone: It'll be easier'now.

Tone III Divided — I can,go.

Tone IV — the Rising—Falling Tone: ^Now.

Tone V — the Rising—Falling—Rising Tone: ^Now.

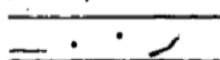
Static Tones:

the High Level Tone : It's'now or'never.

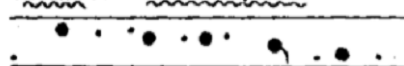
the Low Level Tone: Now,,how did you ,manage,that:

Мал. 6. Сістэма танічнага націска-знака Р. Кінгдана

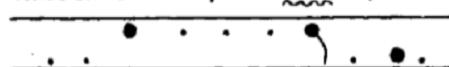
Put on your coat!



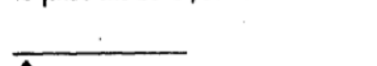
I want to be absolutely sure about it.



What on earth did you do that for, Peter?



Is that the best you can do for us.



Keep it for us.



Мал. 7. Міжрадковая сістэма

I want to go home. or ³I want to go²⁻⁴ home.
₃₋ I want to go home.
₂₋₄

Мал. 8. Лічбавая сістэма

I'm going home. (3-2-4 signals finality)
 I was going home, but it rained. (3-2-3 signals continuation)

Мал. 9. Сігнальная сістэма

He wouldn't believe you.
or
He wouldn't be lieve you.

Мал. 10. Лінгвістычная канфігурацыя вышынь Д. Болінера

Пералічаны найбольш шырока ўжываныя сістэмы абазначэння інтанацыйных малюнкаў (натацый). Некаторыя з якіх маюць шмат абмежаванняў (напрыклад, лічбавая сістэма або музычная натацыя), іншыя больш адэкватныя і гнуткія (напрыклад, прасадычная транскрыпцыя або падрадкавыя сістэмы) [5]. Але аніводная сістэма натацыі не адлюстроўвае дынаміку змянення мінмальна неабходнага базіса прасадычных сродкаў гаворкі – інтэнсіўнасці, хуткасці артыкуляцыі і вышыні асноўнага тону ў фармантнай структуры.

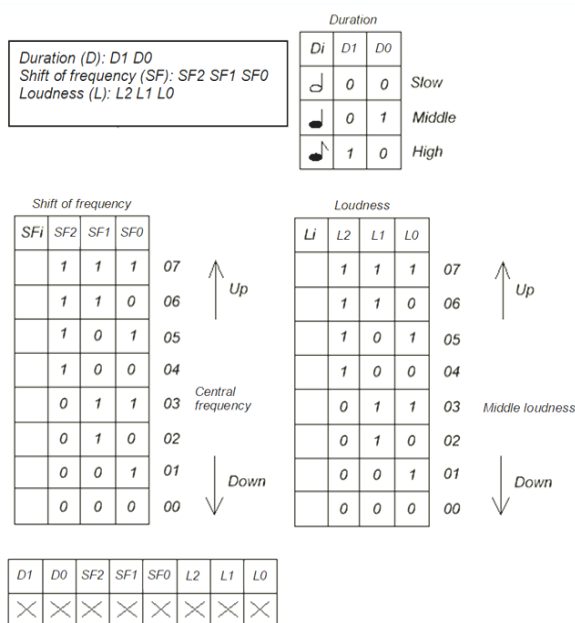
Метад інтанацыйных табулатур. Прапануецца метададавання інтанацыі выказванняў з выкарыстаннем паслядоўнасцей алічбаваных інтанацыйных табулатур, як крок для ўдасканалення маўленчых інтэрфейсаў за кошт незалежнай перадачы ў лічбавых эквівалентах усіх фундаментальных супрасегментных параметраў: 1) вышыні асноўнага тону (частаты); 2) інтэнсіўнасці (гучнасці); 3) тэмпу (працягласці гучання).

У класічнай інтэрпрэтацыі табулатура (познелацінск. *tabulatura*, ад сярэднявеч. лацінск. *tabula* – табліца, схема) уяўляе сабой тып музычнай натацыі, схематычны запіс музыкі для клавійных (аргана, клавесіна), некаторых струнных (лютні, віўэлы, гітары) і (рэдка) духавых інструментаў. Класічная табулатура аперае працоўнымі элементамі музычнай прылады (клавішамі, струнамі, ладамі). Для скарачэння запісу ў табулатуры прымяняюцца літары, лічбы і спецыяльныя сімвалы. У Еўропе росквіт табулатурнай натацыі прыйшоўся на XVI–XVII стагоддзі. У сучаснай практыцы табулатуры часцяком выкарыстоўваюцца для шасціструннай гітары.

Працэс кадавання інтанацыі пачынаецца з аналізу аўдыёсігналу, дзе ключавыя параметры (гучнасць, зрух частаты і працягласць) здабываюцца з запісаных даных.

Гэтыя параметры супастаўляюцца з накіраванымі бінарнымі кодамі, паказанымі ў табліцах. Напрыклад, гучнасць *Loudness* можа вар’іравацца ад цішыні (000) да максімальна высокай (111), зрух частаты фарманты адносна цэнтральнага значэння *Shift of frequency* – ад мінімальнай (самай нізкай) частаты (000) да максімальна высокай (111), а працягласць *Duration* – трыма дыскрэтнымі значэннямі – «павольна» (00), «сярэдне» (01) і «хутка» (10). Кожнае значэнне пакуецца ў агульны 8-бітны код, які затым супастаўляецца з ячэйкамі інтанацыйнай (прасадычнай) табулатуры (матрыцы 8×8).

У залежнасці ад камбінацыі гэтых параметраў у адпаведную ячэйку табліцы запісваецца дыскрэтная нота агульнага меладычнага малюнку, які ўяўляе сабой алічбаваны элемент інтанацыйнага контура.



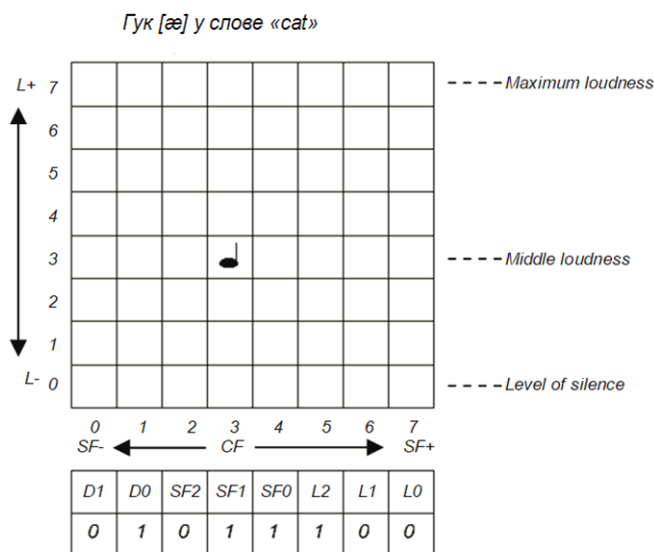
Мал. 11. Прынцып кадавання элемента інтанацыйнага контура

Напрыклад, для галоснага [æ] у слове “cat” гучнасць можа быць сярэдняй (код Loudness = 100), зрух частаты гукавой фарманты – на адну дыскрэту ўніз (код Shift of frequency = 011), а працягласць – сярэдняя (код Duration = 01). Гэтыя біты злучаюцца ў байт і вызначаюць пазіцыю ноты ў інтанацыйнай табулатуры, дзе яна ўсталёўваецца з пазначэннем працягласці.

Такі падыход дазваляе спалучаць кадаванне сегментных адзінак з кадаваннем прасадных (фразавых) сродкаў, што важна для дакладнага сінтэзу гаворкі.

Табулатура ўяўляе сабой матрыцу 8×8 , дзе радкі і слупкі адпавядаюць камбінацыям біт з табліц Duration, Shift of frequency і Loudness.

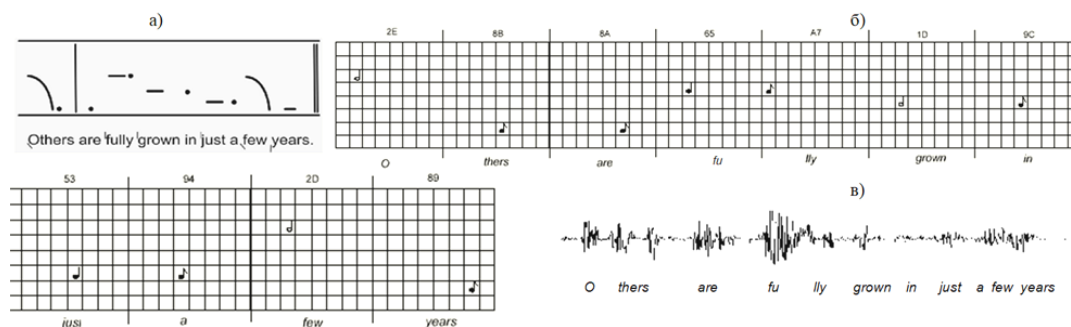
Кожная ячэйка змяшчае знак ноты, або пустое значэнне, калі ў дадзеным месцы кадуецца паўза (код Loudness = 000).



Мал. 12. Прыклад кадавання манафтона «æ» у слове «cat»

Разгледзім кадаванне англійскага сказу “Others are fully grown in just a few years”:

Спачатку словы разбіваюцца на фанемы, пасля гэтага кожная фанема заносіцца ў адпаведную адзіную ячэйку інтанацыйнай табулаты памерам 8×8 . У залежнасці ад інтанацыйнага контуру атрымліваем 8-бітны код для кожнай фанемы. Напрыклад, для “O” 8-бітны код будзе 00101110, а для “thers” – 10001011, і г. д.



Мал. 13. Прыклад кадавання інтанацыйнага контуру фразы «Others are fully grown in just a few years»:

- а – класічны запіс з абазначэннем танічных сімвалаў, распрацаваных R. Kingdon;
 б – запіс у выглядзе паслядоўнасці алічбаваных інтанацыйных табулатур;
 в – часовая форма зарэгістраванага сігналау

Перспективы дальнейших исследований. З улікам праведзенага аналізу, а таксама сфармуляваных прынцыпаў праграма-тэхнічнай рэалізацыі, можна вылучыць наступныя перспектывы далейшых даследаванняў датычна кожнай мовы, узятай у якасці аб’екта даследавання:

1. Выяўленне асноўных акустычных параметраў: вызначэнне і апісанне асноўных характарыстык акустычных інварыянтаў для фанемных апазіцый; вызначэнне і апісанне тыповых інтанацыйных контураў канкрэтнай мовы.

2. Удасканаленне супрасегментнай транскрыпцыі акустычных кампанентаў інтанацыі для праграма-тэхнічнага кадавання меладычнага малюнку маўлення. Разгляд мэтазгоднасці і магчымасці кадавання дадатковага параметра супрасегментнай транскрыпцыі – тэмбра выказвання.

3. Распрацоўка метадалогіі аналізу: стварэнне інструментаў і спосабаў для вымярэння і аналізу акустычных параметраў, якія характарызуюць фанемныя апазіцыі і супрасегментныя фанетычныя адзінкі канкрэтнай мовы.

4. Распрацоўка метадалогіі сінтэзу: стварэнне інструментаў і спосабаў для сінтэзу маўлення на аснове патокавай функцыянальнай суперпазіцыі акустычных інварыянтаў фанемных апазіцый і акустычных кампанентаў інтанацыі.

5. Распрацоўка праграма-тэхнічных сродкаў для аўтаматычнага распазнавання і сінтэзу маўлення; стварэнне базы даных акустычных інварыянтаў фанемных апазіцый і акустычных кампанентаў інтанацыі канкрэтнай мовы.

Літаратура

1. Борисова, Л. В. Теоретическая фонетика английского языка: учеб. пособие для ин-тов и фак. ин. яз. / Л. В. Борисова, А. А. Метлюк. – Минск : Выш. шк., 1980. – 142 с. : ил.
2. Карневская, Е. Б. Практическая фонетика английского языка на продвинутом этапе обучения: учебник / Е. Б. Карневская, Е. А. Мисурно, Л. Д. Раковская ; под общ. ред. Е. Б. Карневской. – 6-е изд., перераб. – Минск : Аверсэв, 2017. – 411 с. : ил.

3. Cruttenden, Alan. *Gimson's Pronunciation of English*. – 8th ed. – Routledge, 2014.
4. Crystal, David. *The Cambridge Encyclopedia of the English Language*. – 3rd ed. – Cambridge University Press, 2019.
5. Wells, John C. *English Intonation: An Introduction*. – Cambridge University Press, 2006.
6. Roach, P. *English Phonetics and Phonology* / P. Roach. – Cambridge, 1990.
7. Sokolova, M. A. [et al.]. *English Phonetics. A Theoretical Course*. – М., 2004.
8. Айфичер, Э. *Цифровая обработка сигналов: практический подход* / Э. Айфичер, Б. Джервис. – 2-е изд., 2004. – 992 с.
9. Лайонс, Р. *Цифровая обработка сигналов* / Р. Лайонс. – 2-е изд. – М., 2004. – 458 с.
10. Рабинер Л. Р. *Теория и применение цифровой обработки сигналов* : пер. с англ. / Л. Р. Рабинер, Б. Голд ; под ред. Ю. Н. Александрова. – М. : Мир, 1978. – 637 с.
11. “Signals and Systems” by Michael D. Adams, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Victoria, British Columbia, Canada, Edition 3.0, 2020. – 728 p.