

## Zur Geschichte des Vocoders in der Sowjetunion

Rüdiger Hoffmann, Rainer Jäckel

TU Dresden, Institut für Akustik und Sprachkommunikation, 01062 Dresden, Deutschland

Email: ruediger.hoffmann,rainer.jaekel@tu-dresden.de

### Einleitung

Der Vocoder wurde zur Bandbreitenreduktion bei der Sprachübertragung in einer Zeit erfunden, in der seine Realisierung noch sehr aufwendig und sein Einsatz daher auf wenige Fälle beschränkt war. Er lieferte jedoch viele neue Einsichten in die Analyse und Synthese des Sprachsignals, so dass er heute als das wichtigste Leitfossil der elektronischen Sprachtechnologie gilt. Aus diesem Grund spielt der Vocoder auch in unseren Arbeiten zur Geschichte der Sprachtechnologie, die im Umfeld der historischen akustisch-phonetischen Sammlung (HAPS) der TU Dresden durchgeführt werden, eine wichtige Rolle [1].

Da der Vocoder auch in sicherheitsrelevanten Anwendungen eingesetzt wurde, gibt es bis heute Lücken in der Darstellung seiner Geschichte. Auch im Bezug auf Deutschland, wo immerhin das erste Patent einer dem späteren amerikanischen Vocoder ähnlichen Anordnung erteilt wurde, sind diese Lücken nur ansatzweise geschlossen [2, 3].

Diese Feststellung gilt besonders für die Entwicklung in der Sowjetunion, die außerhalb der russischsprachigen Literatur bisher vorwiegend über die belletristische Verarbeitung in dem Roman „Im ersten Kreis“ (1968, vollständig 1978, [4]) von ALEKSANDR I. SOLŽENICYN (1918 – 2008, [5]) wahrgenommen worden ist. Dieser wurde nach dem Studium der Mathematik und Physik zum Kriegsdienst eingezogen und diente ab 1943 als Kommandeur einer Schallmessbatterie. 1945 wurde er wegen Kritik an STALIN zu 8 Jahren Lagerhaft verurteilt, von denen er die Zeit von 1947 bis 1950 in einem geheimen nachrichtentechnischen Forschungsinstitut in Marfino bei Moskau verbrachte. Diese Zeit hat er in seinem genannten Roman geschildert, der auch einige Details über die in Marfino durchgeführten Arbeiten zur Sprachanalyse und Sprachverschlüsselung enthält. Auf diese Angaben stützen sich die Aussagen zur Geschichte des sowjetischen Vocoders in den Monografien zur Entwicklung der Sprachtechnologie von M. R. SCHROEDER [6] und zur Geschichte des Vocoders von D. TOMPKINS [7].

Nach dem Ende des Kalten Krieges hat sich die Zugänglichkeit für viele Dokumente in der früheren Sowjetunion verbessert, und manche Beteiligte haben ihre Erinnerungen veröffentlicht. Dass dieses Material trotzdem kaum bekannt ist, liegt wohl an der Sprachbarriere. Wir haben uns deshalb die Aufgabe gestellt, im Rahmen einer Literaturstudie eine bessere Übersicht zu gewinnen, und berichten hier über den bislang erreichten Stand.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Diese Arbeit wurde gefördert durch das BMBF im Rahmen des Projektes „Sprechmaschine“, FKZ 01UQ1601A.

### Bis zum Ende des 2. Weltkrieges

Die Entwicklung der sowjetischen Nachrichtentechnik ist eng mit VLADIMIR A. KOTEL'NIKOV (1908 – 2005, [8]) verbunden, dessen Name auch im Westen bekannt ist. Aus einer Mathematiker-Familie stammend, formulierte er mit nur 25 Jahren in einem Konferenzbeitrag das Abtasttheorem erstmals im ingenieurwissenschaftlichen Kontext. Nach seinem Studienabschluss arbeitete KOTEL'NIKOV am Moskauer Energetischen Institut (MEI) und am Institut für Nachrichtentechnik der Roten Armee (CSRIC). Außer weiteren theoretischen Arbeiten war er maßgeblich an nachrichtentechnischen Projekten beteiligt, so am Aufbau einer Verbindung zwischen Moskau und Chabarovsk.

Für die damit zusammenhängenden Verschlüsselungsaufgaben wurden verschiedene Lösungen bearbeitet. KOTEL'NIKOV, der sich seit einem Patent<sup>2</sup> von 1934 mit diesen Fragen befasste, regte eine Entwicklung an, für die 1939 ein Speziallabor am CSRIC geschaffen wurde. Bei diesem sog. „Mosaikverfahren“ erfolgte sowohl die Verschiebung einzelner Bänder im Frequenzbereich als auch die zeitliche Vertauschung von Sprachsegmenten. Die als „Sobol P“ bezeichnete Apparatur wurde in großen Stückzahlen im Großen Vaterländischen Krieg eingesetzt. Sein Labor wurde aus Moskau in das weit entfernte Ufa verlegt und durch eine Gruppe von Spezialisten aus Leningrad ergänzt.

Die Beschäftigung mit „Sobol P“ führte KOTEL'NIKOV zu einem parametrischen Ansatz analog zum Vocoder. Er berichtet, dass er Kenntnis von dem Beitrag von DUDLEY (1940) über dessen Vocoder bekam, der ihn in seiner Vorgehensweise bestätigte. Anfang 1941 begann in KOTEL'NIKOVs Labor der erste Vocoder in der UdSSR zu arbeiten, woran er sich so erinnert [9]: „*Kurz gesagt, wir fingen an unseren eigenen Vocoder zu bauen. Und kurz vor Kriegsbeginn hatten wir das erste funktionsfähige Muster des Vocoders. Zugegeben, er sprach vorerst noch schlecht, mit zitternder Stimme ...*“

Da Einzelheiten zur Realisierung natürlich nicht publiziert wurden, ist es hilfreich, dass zeitgleich Arbeiten des Leningrader Akustikers LEV L. MJASNIKOV (1905 – 1972, [10]) erschienen [11, 12], die das hohe Niveau der akustischen Phonetik belegen. Er gilt als Erfinder der ersten „objektiven“ Erkennung von Sprachlauten (1937) und habilitierte sich 1942 über technische Phonetik. Ein Patent von 1940 beschreibt eine Parallelfilterbank, wie sie auch für den Analyseteil eines Vocoders geeignet ist.

<sup>2</sup>Im vorliegenden Beitrag wird aus Platzgründen auf die explizite Angabe von Patentliteratur verzichtet.

## Der Marfino-Vocoder

Dem geheimen nachrichtentechnischen Laboratorium in Marfino kommt eine zentrale Rolle bei der Entwicklung der sowjetischen Sprachtechnologie zu, wie aus dem erwähnten Roman von SOLŽENICYN und den Erinnerungen seines prominenten Mitgefangenen LEV Z. KOPELEV (1912 – 1997, [13]) hervorgeht. Da diese belletristischen Arbeiten nur eine grobe Beurteilung der dort durchgeführten Forschung ermöglichen, ist es sehr hilfreich, dass seit 1999 eine auf zahlreichen Quellen beruhende Studie vorliegt, die durch KONSTANTIN FEDOROVİČ KALAČEV (1915 – 2001, [14]), einen der leitenden Mitarbeiter in Marfino, verfasst wurde [15].

Das „Spezialobjekt Nr. 8“ des Innenministeriums in Marfino wurde im Januar 1948 auf Beschluss des Ministerrates in das „Laboratorium Nr. 1“ des Ministeriums für Staatssicherheit (MGB) umgewandelt. Der Gründung ging die Tätigkeit einer von ANDREJ PETROVIČ PETERSON (geb. 1915, [14]) am MGB geleiteten Arbeitsgruppe zur Chiffrierung und Dechiffrierung von Telefonleitungen seit 1943 voraus. Auch das frühere Laboratorium von KOTEL’NIKOV wurde 1946 der Abteilung Regierungskommunikation unterstellt. Mit der Gründung des Laboratoriums in Marfino sollten die wichtigsten Spezialisten zusammengefasst werden. Ende 1948 bestand die Einrichtung aus 490 Mitarbeitern, darunter 280 Gefangenen. KOPELEV gibt an, dass sich darunter auch deutsche Kriegsgefangene befanden [13]. Ein Teil der Ausstattung stammte aus deutschen Reparationsleistungen.

In dem Bericht von KALAČEV wird die Tätigkeit des Labors bei der Entwicklung der Verschlüsselungstechnik insgesamt betrachtet, bei der der Vocoder nur einen Teilaspekt darstellt, auf den wir uns hier konzentrieren.

Die oben genannte PETERSON-Arbeitsgruppe kam schon 1945 zu dem Schluss, dass die weitere Entwicklung der Sprachverschlüsselung vorrangig im Bereich der Vocoder-technik zu erreichen sei. In Marfino wurden zwei Verfahren zur Sprachverarbeitung innerhalb von Verschlüsselungssystemen für Standard-Telefonnetze verfolgt: die Amplitudengrenzung von Sprache (*clipped speech*) und die Technik des Kanalvocoders. Der 1948 bereits verfügbare Vocoder lieferte keine befriedigende Sprachqualität.

KALAČEV schildert die Schwierigkeiten bei der unter hohem Erfolgs- und Zeitdruck stehenden Entwicklung der Chiffriersysteme, wobei nur am Rande deutlich wird, dass verschiedene Vocodervarianten untersucht wurden, während der Einsatz von *clipped speech* 1949 wegen Erfolglosigkeit beendet wurde. Aber auch mit dem Vocoder erreichte man zu der Zeit nur eine Silbenverständlichkeit von 31,2 %. Diese unzureichende Signalqualität war der Hauptkritikpunkt an dem Chiffriersystem M-803, dessen Prototyp im November 1949 einer Erprobung an der Fernsprechstrecke Moskau–Kiew unterzogen wurde.

Da die Qualität der synthetisierten Sprache unbedingt verbessert werden musste, entwickelte der schon erwähnte A. P. PETERSON ein Verfahren, das das Kon-

zept von *clipped speech* mit dem des Vocoder verbunden. Dazu wurde bei einem achtkanaligen Vocoder die Bandbreite des ersten Kanals auf (200 ... 600) Hz erweitert und für die Übertragung von *clipped speech* genutzt. Der verbleibende Frequenzbereich von (600 ... 3400) Hz wird in klassischer Weise auf die verbleibenden sieben Vocoderkanäle aufgeteilt, deren Spektrum auf der Empfängerseite aus der *clipped speech* generiert wird. Durch diese Modifikation wurde eine Silbenverständlichkeit von 51,1 % erreicht. Im April 1950 kam eine Abnahmekommission, der auch V. A. KOTEL’NIKOV angehörte, zu dem Ergebnis, dass M-803 einsatztauglich sei. Nach einem Ministerratsbeschluss vom Juli 1950 sollte das Gerät in Marfino in Kleinserie gefertigt werden.

Man muss daran erinnern, dass derartige Systeme damals einen großen physischen Umfang hatten und entsprechend störanfällig waren. So bestand M-803 aus vier Schaltschränken (Foto siehe [16]) und wurde täglich einer zweistündigen Wartung unterzogen.

Die hier entstandene Modifikation des Vocoder, bei der ein Teil des Sprachsignals im Zeitbereich belassen und nur der Rest parametrisch (als Signalenergie in Frequenzbändern) übertragen wird, wurde später als *Halbvocoder* oder als *voice excited vocoder* bekannt, der demnach in Marfino erfunden worden ist. Die heute verbreiteten ersten Beschreibungen eines Halbvocoder stammen aus den Jahren 1957 [17] bzw. 1960 [18].

Die weitere Verbesserung der Sprachqualität des Vocoder blieb eine andauernde Aufgabe. KALAČEV gibt an, dass 1950/51 mehrere Verbesserungsvorschläge untersucht wurden, darunter die Variante M-803-M von ANTON MICHAJLOVIČ VASILEV (1899 – 1965, [14]), die aufhorchen lässt. Er schlug vor, die Übertragungsrate des ersten Kanals anzuheben und statt dessen die Zahl der übrigen Kanäle auf drei *Formantkanäle* zu verringern, die durch *steuerbare* Filter (Formantfilter) gebildet wurden. Wenn wir diese Angaben richtig interpretieren, wurde hier das Prinzip des Formantvocoders in einer Form vorgeschlagen, wie sie 1950 von MUNSON / MONTGOMERY angegeben wurde [19].

Zur Einschätzung des Übertragungssystems gehört auch, dass es sich vermutlich um das weltweit erste System zur *digitalen* Übertragung von verschlüsselten Vocoder-Signalen handelte [20].

Das Laboratorium in Marfino verlor seine Selbständigkeit im Jahre 1952, als es Bestandteil des Forschungsinstitutes NII-2 wurde, das nach STALINS Tod (nach Zwischenschritten) dem Ministerium für Nachrichtentechnik unterstellt wurde. Mit den Ergebnissen des Laboratoriums Marfino besaß es eine gute Ausgangsbasis [15]: „Die Apparatur M-803-5 wurde im NII-2 weiterentwickelt und für den Einsatz in internationalen Telefonnetzen in Serie gefertigt. Sie wurde ab 1954 zusammen mit der Retranslator-Station M-803-T auf der Trasse Moskau – Berlin getestet. Nach den erfolgreichen Tests (im April/Mai 1954), bei denen es in nur 10 von 1208 Gesprächen zu Mängeln kam, wurde der Einsatz auf die Strecke Moskau – Peking erweitert.“

## Vocoder-Telefonie

Das Laboratorium Marfino hatte die Voraussetzungen für eine Nutzung der Sprachtechnologie auch im zivilen Bereich geschaffen. Während einige Wissenschaftler, so PETERSON und KALAČEV, ihre Arbeit an der Nachfolgeeinrichtung NII-2 (auch „Institut für Automatisierung“) fortsetzten, waren andere im akademischen Bereich tätig, was dazu führte, dass bereits in der Mitte der 1950er-Jahre offene Publikationen zur Sprachkompression und besonders zur Vocoder-Technologie erschienen. Führende Institutionen waren die nachrichtentechnischen Hochschulen in Leningrad (LEIS) und in Moskau (MEIS). Für das Arbeitsgebiet wurden verschiedene Oberbegriffe verwendet, z. B. *Analyse-Synthese-Telefonie*, *Vocoder-Telefonie* oder *Vocoder-Nachrichtenübertragung*. Wir skizzieren nachstehend die Entwicklung an beiden Standorten. Eine breitere Darstellung, die bis in die heutige Zeit reicht, findet man unter [20].

Erwähnt werden soll, dass V. A. KOTEL'NIKOV im Kontext der Sprachtechnologie keine Rolle mehr spielte, da seine wissenschaftlichen Schwerpunkte nach dem 2. Weltkrieg im Bereich der Raumfahrt- und Raketenkommunikation lagen.

### – Leningrad

Für die Entwicklung in Leningrad steht hauptsächlich MICHAEL ANDREEVIČ SAPOŽKOV (1909 – 1994, [14]), der seit 1940 den Lehrstuhl für Rundfunk und Elektroakustik am LEIS leitete (heute SPbGUT, St.-Petersburger Staatliche Universität für Telekommunikation). Seine Arbeiten zur Sprachübertragung und -codierung begannen 1943 mit der Einberufung zum Zentralen Forschungsinstitut für Nachrichtentechnik des Verteidigungsministeriums. Später arbeitete er eng mit dem erwähnten NII-2 zur Thematik des Vocoders zusammen.

Publikationen von SAPOŽKOV auf dem Gebiet der (Sprach-) Akustik sind seit 1946 nachweisbar. Bereits aus dem Jahre 1958 gibt es von ihm einen ausführlichen Übersichtsbeitrag „über Verfahren zur Sprachkompression“, die den damaligen Stand der Technik zusammenfasst [21]. In den darauf folgenden Jahren hat er weitere Beiträge zu diesem Thema geliefert, wobei sich als inhaltlicher Schwerpunkt die Technik des Formantvocoders und der Formantsynthese abhebt [22].

SAPOŽKOV war Autor mehrerer Monografien, die zum Teil auch internationale Auflagen erlebten. Hier ist sein Werk über „das Sprachsignal in Kybernetik und Nachrichtentechnik“ [23] besonders wichtig, das im ersten Teil die Grundlagen über die Sprachkommunikation und das Sprachsignal vermittelt und im zweiten Teil umfassend über Sprachkompression, automatische Erkennung und Synthese der Sprache informiert. Dieses beeindruckende Werk erschien bereits 1963, also zwei Jahre eher als das vom Anliegen vergleichbare, international sehr bekannt gewordene Buch von J. FLANAGAN [25]. Zwei Jahrzehnte später erschien ein aktuelles Lehrbuch über den Vocoder mit VADIM GEORGIEVIČ MICHAJLOV als Co-Autor [24].

### – Moskau

In Moskau wirkte ANDREJ ANDREEVIČ PIROGOV (1914 – 2004, [14, 26]) auf dem Gebiet der Kybernetik, Linguistik und Informationstheorie u. a. am MEIS (heute MTUSI, Moskauer TU für Kommunikation und Information). Er hat in seinen Arbeiten zur Technik des Vocoders besonders zur Entwicklung der sog. *harmonischen Synthese* beigetragen [27], wobei die Entwicklung des *harmonischen Vocoders* („Harmonifon“) anscheinend am NII-2 erfolgte [28].

Bereits 1963 legte er eine Monografie zur *synthetischen Telefonie* vor [28], mit der die Absicht verfolgt wird, die noch bestehende Lücke in der sowjetischen Lehrbuchliteratur zu schließen. 1968 besorgte er die russische Übersetzung des bereits erwähnten Werkes von J. FLANAGAN [25]. Basierend auf der gemeinsamen Arbeit an einer kommerziell einsetzbaren Version in den Jahren 1960 – 1970 entstand unter Federführung von PIROGOV 1974 ein umfangreiches Werk über Vocoder-Telefonie als Kollektivarbeit [29].

Für die Lehrbuchliteratur noch relativ neu ist darin das 9. Kapitel, verfasst von R. D. LEJTES und V. N. SOBOLEV, über die *Modellierung des Systems zur synthetischen Telefonie mit Hilfe digitaler Rechenanlagen*. Es enthält Grundsätzliches zur Rechentechnik, AD- und DA-Wandlung, Prinzipien der digitalen Verarbeitung des Sprachsignals, Algorithmen zur Berechnung von Fourierkoeffizienten und zu Digitalfiltern, so dass damit auch der Übergang in die neue Zeit der digitalen Signalverarbeitung dokumentiert ist.

## Zusammenfassung

Unsere Literaturstudie, die in der Zukunft noch weiter vertieft werden soll, hat die folgenden Kernaussagen geliefert:

- Anfängliche Entwicklungen sind durch die Forderung nach sicherer Sprachübertragung entstanden.
- Der bedeutende Theoretiker V. A. KOTEL'NIKOV hat sich auch dem Kanalvocoder gewidmet (Fertigstellung 1941/42).
- Die Entwicklung des Marfino-Vocoders hat bis 1951/52 zu bemerkenswerten Ergebnissen geführt:
  - Erfindung des Halbvocoders,
  - Aufnahme der Arbeit am Formantvocoder,
  - digitale Übertragung der verschlüsselten Sprache.
- Seit Mitte der 1950er-Jahre entwickelt sich die (zivile) Vocoder-Telefonie.
- Die Zentren der weiteren Entwicklung liegen am LEIS (SAPOŽKOV) und MEIS (PIROGOV), dokumentiert durch zahlreiche Publikationen und wichtige Lehrbücher.
- Mitte der 1970er-Jahre erfolgt der Übergang zur digitalen Signalverarbeitung.

## Anhang: Grafische Musik

Die Möglichkeit, in der parametrischen Darstellung eines akustischen Signals völlig neue Manipulationen durchführen zu können, hat dazu geführt, dass der Vocoder eine Parallelexistenz in der Kunst entwickelte, zuerst in der musikalischen Avantgarde, später in der populären Musik.

Zu dieser Technologie gibt es frühe Versuche, von denen mindestens einer in der Sowjetunion der 1930er-Jahre angesiedelt ist. Es handelt sich um eine Modifikation des Lichttonverfahrens zwecks Erzeugung synthetischer Schallsignale. EVGENIJ ALEKSANDROVIČ ŠOLPO (1891 – 1951) erfand das „Variophon“ zur Erzeugung synthetischer Tonspuren. Der Musikwissenschaftler und Komponist ARSENIJ MIHAJLOVIČ AVRAAMOV (1886 – 1944) experimentierte mit synthetischen Tonspuren mit dem Ziel der Schaffung einer neuen Musik „jenseits von Temperierung und Tonalität“.

Die Erfindung von ŠOLPO ist durch Patente und eine Zeitschriftenveröffentlichung von 1935 nachvollziehbar. Sein Laboratorium am Institut für Musikwissenschaft mit der Apparatur und zahlreichen Aufnahmen ist während eines Bombenangriffs auf das belagerte Leningrad zerstört worden. Nach dem Krieg entwickelte er ein Verfahren, das die Erzeugung synthetischer Tonspuren auf einem ferromagnetischen Träger ermöglichte [30].

## Literatur

- [1] Hoffmann, R.: On the development of early vocoders. Proc. of the 2nd IEEE Conference on the History of Telecommunications (Histelcon 2010) – A Century of Broadcasting, Madrid, 3. – 5. 11. 2010, S. 359 – 364.
- [2] Hoffmann, R.: Zur Entwicklung des Vocoder in Deutschland. DAGA 2011, 37. Jahrestagung für Akustik, Düsseldorf, 21. – 24. 3. 2011, Tagungsband „Fortschritte der Akustik“, S. 149 – 150.
- [3] Hoffmann, R.; Gramm, G.: The Sennheiser vocoder goes digital: On a German R&D project in the 1970s. Proc. of the 2nd International Workshop on the History of Speech Communication Research (HSCR 2017), Helsinki, 18. – 19. 8. 2017. Dresden: TUDpress 2017 (Studentexte zur Sprachkommunikation, Band 83), S. 35 – 44.
- [4] Solschenizyn [Solženicyŋ], A.: Im ersten Kreis. Aus dem Russ. übersetzt und zusammengetragen von S. Geier. Vollständige Ausgabe der wiederhergestellten Urfassung. Frankfurt am Main: S. Fischer Verlag 1982.
- [5] Сараскина, Л.: Солженицын. Москва: Молодая Гвардия 2009 (Жизнь Замечательных Людей; Bd. 1375).
- [6] Schroeder, M. R.: Computer Speech: Recognition, Compression, Synthesis. Berlin etc.: Springer 1999 (Springer Series in Information Sciences; 35).
- [7] Tompkins, D.: How to wreck a nice beach: the vocoder from World War II to hip-hop. Brooklyn: Melville House / Chicago: Stop Smiling Media 2010.
- [8] Nitusov, A. (ed.): Vladimir Alexandrovich Kotelnikov. Russian Virtual Computer Museum; URL (24. 1. 2018): [http://www.computer-museum.ru/english/galglory\\_en/Kotelnikov.htm](http://www.computer-museum.ru/english/galglory_en/Kotelnikov.htm)
- [9] Котельников, В. А.: Судьба, охватившая век. Том 2: Н. В. Котельникова об отце. Москва: Физматлит 2011.
- [10] [Nachruf auf] Лев Леонидович Мясников. Акустический журнал 18 (1972), No. 4, S. 644f.
- [11] Мясников, Л. Л.: Объективное распознавание звуков печи. Журнал Технической Физики 13 (1943), No. 3, S. 109 – 115.
- [12] Мясников, Л. Л.: Звуки речи и их объективное распознавание. Вестник Ленинградского Университета 1946, No. 3, S. 3 – 13.
- [13] Kopelev, L.: Tröste meine Trauer. Autobiographie 1947 – 1954. München: DTV, durchgesehene und erweiterte Ausgabe 1983.
- [14] Емельянов, Г.; Ларин, Д.; Бутырский, Л.: Защитники речи. BIS Journal 13 (2014) No. 2.
- [15] Калачёв, К. Ф.: В кругу третьем. Воспоминания и размышления о работе Марфинской лаборатории в 1948-1951 годах. Москва 1999.
- [16] Abbildung von M-803 auf der Webseite von V. V. Grebennikov, URL (18. 3. 2018): <http://cryptohistory.ru/media/images/M-803.jpeg>
- [17] Feldman, C. B. H.: Band compression system. US Patent 2,817,711, beantragt 1954, erteilt 1957.
- [18] Schroeder, M. R.; David, E. E.: A vocoder for transmitting 10 kc/s speech over a 3.5 kc/s channel. Acustica 10 (1960), S. 35 – 43.
- [19] Munson, W. A.; Montgomery, H. C.: A speech analyzer and synthesizer. JASA 22 (1950) 5, S. 678. — vgl. auch [25], S. 262.
- [20] Михайлов, В. Г.: Из истории исследований преобразования речи. Речевые технологии / Speech Technology 1/2008, S. 93 – 113; 2/2008, S. 81 – 96.
- [21] Сапожков, М. А.: О методах «компрессии» речи. Электросвязь (1958), No. 8, S. 36 – 47.
- [22] Сапожков, М. А.: Перспективы применения формантных вокодеров. Электросвязь (1969), No. 10, S. 41 – 47.
- [23] Сапожков, М. А.: Речевой сигнал в кибернетике и связи. Москва: Связьиздат 1963.
- [24] Сапожков, М. А.; Мичайлов, В. Г.: Вокодерная связь. Москва: Радио и связь 1983.
- [25] Flanagan, J. L.: Speech Analysis, Synthesis and Perception. Berlin etc.: Springer 1965; 2nd, expanded edition 1972 (Kommunikation und Kybernetik in Einzeldarstellungen, Band 3).
- [26] Русское физическое общество [Russische Physikalische Gesellschaft], Webseite, URL (15. 3. 2018): <http://www.rusphys.ru/about/>
- [27] Пирогов, А. А.: Гармоническая система сжатия спектров речи. Электросвязь (1959), No. 3, S. 8 – 17.
- [28] Пирогов, А. А.: Синтетическая телефония. Москва: Связьиздат 1963 (Лекции по технике связи).
- [29] Пирогов, А. А. (ред.): Вокодерная телефония. Методы и проблемы. Москва: Связь 1974.
- [30] Рисованный звук. Webseite, URL (9. 3. 2018): <http://www.etheroneph.com/retrozvuk/64-risovannyj-zvuk.html>